

3 Okt 1969/002  
mit Originalfotos

LEHRSTUHL FÜR BAUKONSTRUKTIONSLEHRE UND HOLZBAU  
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG  
o. Prof. Dr.-Ing. Heinrich P a s c h e n

Die Gas- und Wasserdichtigkeit  
von Stahlbeton-Plattenstreifen

Bericht erstattet  
von  
Dr.-Ing. J. Steinert  
1970

BIBLIOTHEK  
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
der Technischen Universität Braunschweig  
Beethovenstraße 52  
D-3300 Braunschweig

Die Untersuchungen wurden im Auftrag und mit Unterstützung des  
Herrn Bundesministers für Wohnungswesen und Städtebau durchgeführt.  
Ein Teil der für die Messungen verwendeten Geräte sind Leihgaben  
der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Bad Godesberg.

Az.: II A 9 - 81 07 05 - 135

## Kurzfassung zum Forschungsauftrag:

### Gas- und Wasserdichtigkeit von Stahlbeton-Plattenstreifen

Im Auftrage des Herrn Bundesministers für Wohnungswesen und Städtebau sind 1969 an der Technischen Universität Braunschweig Untersuchungen der Gas- und Wasserdichtigkeit statisch bis zur Traglast beanspruchter Stahlbeton-Plattenstreifen durchgeführt worden. Die Aufgabenstellung ging davon aus, daß die Dichtigkeit in Abhängigkeit von der Biegebeanspruchung mit Anzahl, Breite und Tiefe der Risse auf der Zugseite in bestimmter Weise abnimmt. Ziel der Untersuchungen war es, denjenigen Grenzwert für die Biegerotation eines Querschnittes zu finden, bei dem die Wasser- und Gasdichtigkeit gerade noch gewährleistet ist.

Insgesamt wurden zwölf Plattenstreifen mit den Abmessungen Länge/Breite/Dicke = 332/64/32 cm einer statischen Vorbelastung als Einfeldträger unterworfen, und davon zehn auf Dichtigkeit geprüft. Als Bewehrung wurde Baustahl I, glatt und mit schräggerippter Profilierung, und Baustahl IIIb verwendet. Der Bewehrungsgehalt lag zwischen 0,24% und 0,64%. Die Betongüte sollte Bn 200 und Bn 250 entsprechen.

Durch die statische Vorbelastung wurde die Biegedruckzone der am stärksten beanspruchten, vor dem Bruch noch rechtzeitig entlasteten Plattenstreifen auf ungefähr 2 cm reduziert, was einer Querschnittsrotation von etwa 0,03 rad entspricht. Die Gas- und anschließend die Wasserdichtigkeit wurde an 1 m langen Versuchskörpern, die aus dem Feldbereich der vorbelasteten Stahlbetonplatten herausgesägt wurden, auf einem hierzu konstruierten Prüfstand bestimmt. Die Prüfung der Gasdichtigkeit erfolgte mit Luft; es wurde der Druckabfall in Abhängigkeit von der Zeit, ausgehend von 500 mmWS Überdruck, gemessen. Zur Prüfung der Wasserdichtigkeit wurde ein Überdruck von 5 mWS aufgebracht und über einen Zeitraum von 24 Stunden beobachtet, ob sich auf der dem Wasser abgewandten Biegedruckseite eine Durchfeuchtung ergab.

Wie die Untersuchungen gezeigt haben, ist die Gas- und Wasserdichtigkeit gewährleistet, solange die statische Vorbeanspruchung nicht zu einer Verletzung der Biegedruckzone führt. Wird die Druckzone nur durch einen einzigen Haarriß verletzt, was bei einer Höhe von 2 bis 3 cm befürchtet werden muß, geht die Dichtigkeit spontan verloren. An einem Versuchskörper konnte beobachtet werden, daß dann der Luftdruckabfall von 500 mmWS auf 50 mmWS bereits in 63 Sekunden erfolgt, während er bei unbeschädigter Druckzone erst in mehr als 12 Stunden eintritt. Auch die Wasserdichtigkeit geht

durch Haarrisse in der Biegedruckzone verloren. Durch den gleichen Versuchskörper, der einen 70 cm langen Haarriß in der Druckzone aufwies, flossen in 8 Stunden 187 l Wasser; hingegen konnte bei unverletzter Biegedruckzone, trotz klaffender Risse in der Zugzone nur ein Wassereindringvorgang, jedoch keine stationäre Durchlässigkeit beobachtet werden.

Da diese Beobachtungen nur an einem einzigen, mit Stahl I bewehrten Versuchskörper gemacht wurden, sollten die angegebenen Werte für die Durchlässigkeit noch nicht verallgemeinert, sondern nur zur Kennzeichnung der Größenordnung verwendet werden.

Aufgrund der bisher vorliegenden Untersuchungsergebnisse muß zur Gewährleistung der Gas- und Wasserdurchlässigkeit bei einer Betonstauchung von  $\epsilon_b = 1,5 \%$  eine mindestens 3 cm dicke unbeschädigte Biegedruckzone gefordert werden. Unter Bezug auf die Prüfkörperabmessungen entspricht diesem Wert auf 20 cm Meßlänge eine maximale Querschnittsrotation von 0,01 rad und bei 30 cm Plattendicke einem Plastifizierungsgrad von  $\epsilon_e/\epsilon_s = 10$ .

Eine derartig starke Plastifizierung des Stahles wird nur in den wenigsten Fällen vor dem Bruch der biegebeanspruchten Stahlbetonbauteile zum Stillstand kommen. Daher kann die Gas- und Wasserdichtigkeit solange als gegeben angesehen werden, wie die statische Traglast gewährleistet ist. Prüfkörper, deren unbeschädigte Biegedruckzone unter den Versuchsbedingungen nur durchfeuchtet wird, gelten hierbei noch als dicht.

Es wurde ferner festgestellt, daß die durch einen Riß dringende Wassermenge - im Bereich bis 5 mWS Druck - etwa mit dem Quadrat des Wasserdruckes zunimmt. Das Wasseraufnahmevermögen (Speicherung) in der Zugzone aufgerissener, aber noch wasserdichter Stahlbetonbauteile läßt sich quantitativ befriedigend mit der Wassereindringzahl A beschreiben. Bei den als gas- und wasserdicht eingestuften Versuchskörpern konnte weder eine Abhängigkeit der Wasseraufnahme bzw. Luftdruckabnahme von der Biegerotation oder von der Dicke der unbeschädigten Druckzone, noch ein gesetzmäßiger Zusammenhang zwischen Wasser- und Gasdichtigkeit hergestellt werden.

## Inhalt

	Seite
1. Aufgabenstellung und Versuchskonzeption	2
2. Teil A: Statische Vorbelastung der Prüfkörper	5
A1: Einleitung	5
A2: Theoretisches Verformungsverhalten	6
A3: Versuchsdurchführung	9
A4: Versuchsergebnisse	11
3. Teil B: Untersuchung der Gas- und Wasserdichtigkeit	20
B1: Einleitung	20
B2: Beschreibung des Prüfstandes zur Bestimmung der Gas- und Wasserdichtigkeit	21
B3: Gasdichtigkeit biegebeanspruchter Stahlbeton- Plattenstreifen	24
B3.1 Kennzeichnung der Gasdichtigkeit	24
B3.2 Versuchsdurchführung	26
B3.3 Meßergebnisse	27
B4: Wasserdichtigkeit biegebeanspruchter Stahlbeton- Plattenstreifen	32
B4.1: Kennzeichnung der Wasserdichtigkeit	32
B4.2: Versuchsdurchführung und Beobachtungen	34
4. Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse	41

### Anlagen:

Teil A: 13 Anlagen

Teil B: 17 Anlagen



## 1. Aufgabenstellung und Versuchskonzeption

Im Auftrage des Herrn Bundesministers für Wohnungswesen und Städtebau sind 1969 Untersuchungen der Gas- und Wasserdichtigkeit statisch bis zur Traglast beanspruchter Plattenstreifen durchgeführt worden. Die Aufgabenstellung ging davon aus, daß die Dichtigkeit in Abhängigkeit von der Biegebeanspruchung mit Anzahl, Breite und Tiefe der Risse auf der Zugseite der Versuchskörper in bestimmter Weise abnimmt. Ziel dieser Untersuchungen war es, denjenigen Grenzwert für die Biegerotation eines Querschnittes zu finden, bei dem eine Wasser- und Gasdichtigkeit gerade nicht mehr gewährleistet ist.

Die Festlegung des Arbeitsplanes und der Versuchsdurchführung erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber. Bei der Gestaltung der Prüfkörper sollte einerseits ein möglichst großer Bereich hinsichtlich der Bewehrung, der Betongüte und der Stahlart variiert werden, andererseits sollte sich das Programm an Versuche, die 1965 von der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) in Berlin durchgeführt wurden, anlehnen. Daher waren die Querschnittsabmessungen der Plattenstreifen mit  $b = 64$  cm Breite,  $d = 32$  cm Dicke, die Länge mit etwa 3 m und ein Bewehrungsprozentatz von etwa  $\mu = 0,42\%$  festgelegt. Bei den BAM-Versuchen wurden sehr große Verformungen im Bruchzustand, dargestellt durch die maximale Biegerotation, ermittelt.

Im Gegensatz zur BAM, die nur in einem Querschnitt maximale Biegebeanspruchung aufbrachte, wurde bei den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen die statische Vorbelastung so vorgenommen, daß über eine Plattenlänge von 1,60 m eine konstante Biegebeanspruchung wirkte. In diesem Bereich war also bis zum Auftreten der ersten Risse (Zustand I) gleiche Verformung in allen Querschnitten und bei höherer Beanspruchung (Zustand II) eine gleichmäßige Verteilung der Risse zu erwarten.

Insgesamt wurden 12 Plattenstreifen der statischen Vorbelastung unterworfen, wovon 10 als Versuchskörper für die Prüfung der Gas- und Wasserdichtigkeit Verwendung fanden. Außerdem wurden zur Funktionsprüfung des im Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau errichteten Dichtigkeitsprüfstandes zwei spezielle, nicht vorbelastete Stahlbetonplatten hergestellt. Als Bewehrungsstahl wurde Stahl I, Stahl IIIb sowie eine Sonderwalzung von schräggeripptem Stahl I untersucht. Die Betongüte sollte  $B_n 200$  und  $B_n 250$  entsprechen; sie lag damit niedriger als bei den in der BAM durchgeführten Versuchen (dort  $B 450$ ). Für das Betonalter zum Zeitpunkt der Dichtigkeitsprüfungen waren etwa 3 Monate vorgesehen.

Die Prüfung der "Gas"- Dichtigkeit erfolgte ausschließlich mit Druckluft.

Der maximale Prüfdruck wurde auf 0,5 atü entsprechend 5 mWS für die Wasserdichtigkeit festgelegt. Da bei der statischen Vorbelastung der Plattenstreifen je nach Bewehrungsgehalt recht unterschiedliche Rißabstände zu erwarten waren, mußte der zu prüfende Ausschnitt aus den einzelnen Platten mindestens etwa 1 m Länge besitzen. Aus diesen Grundforderungen ergaben sich folgende Alternativen für die Versuchskonzeption.

**Konzeption 1: Statische Belastung in den ursprünglich vorgesehenen drei Beanspruchungsstufen mit zwischenzeitlich durchgeführten Dichtigkeitsprüfungen**

Ein derartiges Vorgehen ist bei Forderung einer vertretbaren Meßunsicherheit nur dann möglich, wenn die Dichtigkeitsprüfung am statisch belasteten Prüfkörper durchgeführt wird. Bei der Versuchsdurchführung hätten jeweils die Meßgeräte zur Verformungsmessung abgebaut und für die Ermittlung der Durchlässigkeit ein Druckgefäß dicht abschließend um den Prüfkörper gelegt werden müssen. Allein für den Aufbau einer derartigen Einrichtung wurde ein Zeitaufwand von 1 bis 2 Stunden geschätzt, zu dem dann noch die u.U. mehrstündige Meßzeit käme. Bei der Ermittlung der Grenzzrotation ist jedoch eine derartige Belastungsdauer wegen der Fließ- und Kriecheinflüsse nicht vertretbar; es sei denn, der Prüfkörper würde zwischenzeitlich entlastet. Dann entfällt jedoch die Notwendigkeit, statische Vorbelastung und Dichtigkeitsprüfung in ein und demselben Prüfaufbau vorzunehmen.

Der geforderte Prüfdruck von  $0,5 \text{ kp/cm}^2$  bedeutet einen Druck von  $5 \text{ Mp je m}^2$  Oberfläche des Prüfkörpers und des Prüfgefäßes. Da die Prüfeinrichtung variabel, leicht zerlegbar, mit relativ einfachen Mitteln aufzubauen und sowohl für die Gas- als auch für die Wasserdichtigkeit Verwendung finden sollte, ergaben sich bereits unter diesen Forderungen eine Reihe konstruktiver Probleme. Bei der vorgesehenen Prüflänge von etwa  $1 \text{ m}$  ist es nicht erforderlich, die gesamten  $3,3 \text{ m}$  langen Plattenstreifen auf Dichtigkeit zu prüfen. Es ist sinnvoll, die Bereiche des Prüfkörpers, die der Krafteinleitung bzw. der Unterstützung dienen und ohnehin schwächer belastet werden, nicht der Gas- und Wasserdichtigkeitsprüfung zu unterwerfen, sondern nur den Beanspruchungsbereich mit konstantem Biegemoment. Unter diesem Gesichtspunkt ergaben sich zwei Möglichkeiten für die Gestaltung der Dichtigkeitsprüfkörper und entsprechende Konsequenzen für die statische Vorbelastung. Beispielsweise kann man die Prüfkörper in der späteren Prüflänge von  $1 \text{ m}$  betonieren und für die statische Vorbelastung an beiden Längsseiten Stahlträgerkonstruktionen anflanschen. Gegen eine derartige Lösung ist jedoch einzuwenden, daß bei Anflanschen von Stahlträgern auf jeder Seite ein gestörter Lasteinleitungsbereich in der Größenordnung der Plattendicke zu einer Verfälschung der ausschließlich beabsichtigten Beanspruchungen mit einem konstanten Biegemoment führt. Außerdem ergaben sich aber auch Bedenken im Zusammenhang mit der Reproduzierbarkeit und der Vergleichbarkeit nacheinander gewonnener Meßergebnisse. Wie sich später auch bestätigt hat, erfordern die Prüfungen einen erheblichen Aufwand zur Abdichtung des Prüfgegenstandes gegenüber der Meßanordnung. Die Durchführung der Prüfungen nimmt daher erfahrungsgemäß mindestens zwei Tage in Anspruch, wenn man davon absieht, daß vor den Wasserdichtigkeitsprüfungen die Versuchskörper 24 Stunden gewässert werden sollten und anschließend geraume Zeit bis zum Wiedereinstellen der Gleichgewichtsfeuchte vergeht. Es erschien daher zweifelhaft,

ob nach einem so langen Zeitraum die Anschluß-Meßwerte noch ein charakteristisches Verhalten der Versuchskörper wiedergeben. Außerdem war auch nicht auszuschließen, daß sich in die Risse Feinanteile des Mörtels setzten, die bei einer Wiederbeanspruchung eine erhöhte Bruchgefahr der Biegedruckzone bedeuteten.

**Konzeption 2: Statische Belastung in drei Beanspruchungsstufen bis zur Traglast und daran anschließend Durchführung der Dichtigkeitsprüfungen**

Sämtliche Prüfkörper werden also bis kurz vor das Versagen der Tragfähigkeit beansprucht, anschließend wird der Bereich konstanter Momentenbelastung aus dem Prüfkörper herausgesägt und dieser so gewonnene Versuchskörper den beabsichtigten Gas- und Wasserdichtigkeitsprüfungen unterzogen. Diese Konzeption erlaubt bei der statischen Vorbelastung ein schrittweises Annähern an eine minimale Dicke der Biegedruckzone und damit auch den gewünschten Vergleich mit den Untersuchungsergebnissen der BaM, erfordert nur eine einmalige Einbettung der Versuchskörper in dem Prüfstand und gestattet damit die Durchführung der Gas- und Wasserdichtigkeitsprüfung innerhalb eines Versuchsganges.

Aufgrund der geschilderten Überlegungen wurde die Versuchsdurchführung nach Konzeption 2 festgelegt. Die Zweckmäßigkeit dieses Vorgehens zeigte sich bereits nach Prüfung der ersten Versuchsplatten daran, daß bei einer ausreichend dicken, unverletzten Biegedruckzone die Dichtigkeit immer gewährleistet ist. Es hätte also keinen Zweck gehabt, entsprechend den ursprünglichen Absichten, die Gas- und Wasserdichtigkeit auch bei noch geringeren Belastungsstufen zu prüfen.

In den beiden nachfolgenden Abschnitten dieses Berichts werden Versuchsdurchführungen und Ergebnisse der statischen Vorbelastung (Teil A) und der Dichtigkeitsprüfungen (Teil B) ausführlich beschrieben.

## 2. Teil A: Statische Vorbelastung der Prüfkörper<sup>1)</sup>

### A1: Einleitung

Die Gas- und Wasserdichtigkeit biegebeanspruchter Stahlbetonplatten hängt sowohl von betontechnologischen Eigenschaften, wie Betongüte und Porosität, als auch von der Belastung, genauer von der Dicke der Biegedruckzone, ab. Daher wurden die einzelnen Versuchskörper mit zunehmendem Biegemoment beansprucht, bis eine minimale bzw. eine vorgegebene Dicke der Biegedruckzone erreicht war. Nach dieser statischen Vorbelastung erfolgten am Mittelteil der Prüfkörper die in Abschnitt B3 und B4 näher erläuterten Dichtigkeitsprüfungen.

Die statische Vorbelastung sollte zumindest teilweise auch dazu dienen, Ergebnisse von Untersuchungen in der BAM über die Gelenkbildung von Stahlbetonplatten unter statischer Belastung zu bestätigen; deshalb waren die Abmessungen jener Versuchskörper hier zu übernehmen. Allerdings sind zwei wesentliche Unterschiede gegenüber den BAM-Versuchen anzuführen:

1. Die Beanspruchung erfolgte hier mit einem über den Prüfbereich konstanten Biegemoment, um bis zum Eintritt der ersten Risse eine möglichst längenunabhängige Querschnittsrotation aufrecht zu erhalten und danach einen deutlichen Unterschied im Verhalten der einzelnen Versuchskörper erkennen zu können (Stahl I: wenige, klaffende Risse - Stahl IIIb: mehrere Haarrisse). Bei Entstehung mehrerer Risse ist allerdings kaum eine Bestimmung der maximalen Biegerotation möglich. Demgegenüber wurde in der BAM nicht nur mit einem Kräftepaar, sondern auch mit Einzelkräften über vorgegebenen Rissen belastet, da sich die Fließgelenke an bestimmten Stellen ausbilden und dort die Querschnittsrotationen gemessen werden sollten.
2. Die Beanspruchung war bei den früheren Untersuchungen wesentlich größer als bei den hier beschriebenen. Die Prüfkörper wurden bei den Berliner Versuchen bis zu maximal geöffneten Fließgelenken belastet, wobei auf der Zugseite Rißweiten von mehr als 60 mm auftraten. Es kann unterstellt werden, daß bei derartigen Beanspruchungen die Druckzone nicht mehr frei von Rissen, zumindest nicht mehr frei von Haarrissen ist. Damit kann aber auch eine Dichtigkeit nicht mehr erwartet werden.

Bei den nachfolgend geschilderten Untersuchungen wurde dagegen durch besonders vorsichtige Laststeigerung versucht, die Biegedruckzone, von der die Dichtigkeit abhängt, nicht übermäßig zu beanspruchen und die Versuchsplatte möglichst vor Erreichen der Bruchlast entlastet. Bei einer Biegebeanspruchung gilt im Zustand II ein bestimmter Zusammenhang zwischen der Dehnung der Bewehrungsstähle und der Höhe der Biegedruckzone. Wird ein Versuchskörper entlastet, so verkürzen sich die Stähle entsprechend ihren elastischen Eigenschaften. Theoretisch müßte sich ein Riß wieder schließen, sofern der Stahl zwischenzeitlich keine plastischen Verformungen erfahren hat. Praktisch wird sich ein Riß nicht derart ideal verhalten können, da die Rißufer gegenseitig verkanten und damit in der Platte einen Biegebeanspruchungszustand (Eigen-  
spannungszustand) erzeugen, der - bei Rissen, die sich

<sup>1)</sup> Die Planung, Durchführung und Auswertung dieses Versuchsabschnitts wurde von Herrn Dipl.-Ing. E. Brüggenmann betreut.

weiter als die Spannungsnulllinie im Zustand I erstrecken - dem während der Versuche herrschenden entgegengesetzt ist. Querschnittsbereiche, die während der Belastung der Biegedruckzone angehören, können nach der Entlastung in einer solchen "Eigenspannungs-Zugzone" liegen. Daher erschien es ratsam, im Versuch nicht zu geringe Druckzonenhöhen zu erzeugen, die unter Umständen später - beim Kürzen der Versuchskörper oder beim Transport - infolge des Eigenspannungszustandes den Prüfkörper zerstören könnten.

Vom Auftraggeber waren die in Tabelle 1 angegebenen Plattentypen zur Prüfung vorgeschlagen worden, s. S. 15. Das Verhalten dieser Stahlbetonquerschnitte unter Biegebeanspruchung ist zunächst rechnerisch untersucht worden, vgl. Abschnitt A2. Das Ergebnis dieser theoretischen Betrachtung zeigt, daß aufgrund der aus früheren Untersuchungen übernommenen Prüfkörperabmessungen meistens Bruchmomente zu erwarten waren, die nur wenig größer als die Rißmomente sind. Ferner war der Spielraum in der Belastung zwischen Überschreitung der Fließgrenze des Stahles und Bruch so klein, daß eine gezielte Verwirklichung vorgegebener Plastifizierungsgrade

$$\nu = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_s} \gg 1 \text{ und der gewünschten Minimaldicke der Biegedruckzone } x =$$

1,5 cm bis 2,5 cm nicht erreicht werden konnte.

## A2: Theoretisches Verformungsverhalten

Durch eine n-freie Berechnung wurden die der Biegebeanspruchung zugeordneten Dehnungszustände für die in Tabelle 1 angegebenen Bewehrungstypen und Betongüten ermittelt. Hierbei wurden folgende Annahmen über das Baustoffverhalten und die Abmessungen getroffen.

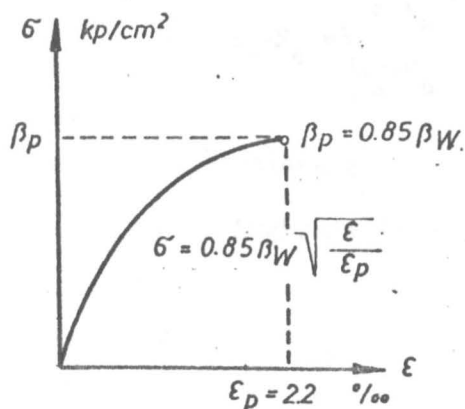
### 1. Abmessungen

$$\text{Breite/Dicke/Höhe} = b/d/h = 64/32/29,7 \text{ cm}$$

Die angegebene Höhe h ergibt sich bei einer Betondeckung von 1,5 cm und einem Stahldurchmesser von 16 mm,

### 2.1 Beton

Folgende Spannungs-Dehnungslinie soll für alle Betongüten gelten:



$\beta_W$  : Würfelfestigkeit

$\beta_p$  : Prismenfestigkeit

Mit diesem Ansatz soll das Kurzzeit-Verformungsverhalten der Stahlbetonplatten im Sinne von DIN 1045 Neufassung möglichst wirklichkeitsnah erfaßt werden.



Völligkeitsbeiwert  $\alpha$ :

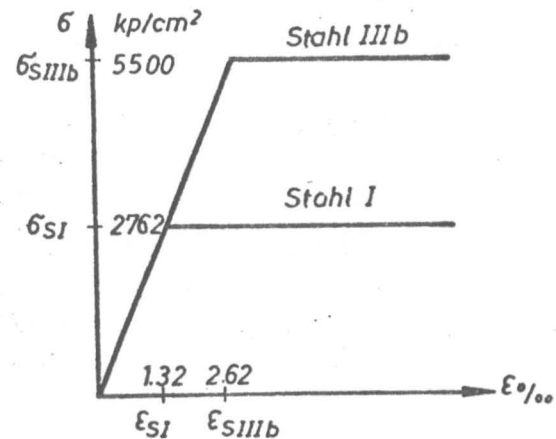
$$\alpha = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_p} - \frac{\epsilon_b^2}{3\epsilon_p^2}, \quad 0 \leq \epsilon_b \leq \epsilon_p$$

Beiwert  $\kappa$  für die Ermittlung des Schwerpunktabstandes der Druckzone von der Nulllinie

$$\kappa = \frac{2 - 0,75 \frac{\epsilon_b}{\epsilon_p}}{3 - \frac{\epsilon_b}{\epsilon_p}}, \quad 0 \leq \epsilon_b \leq \epsilon_p$$

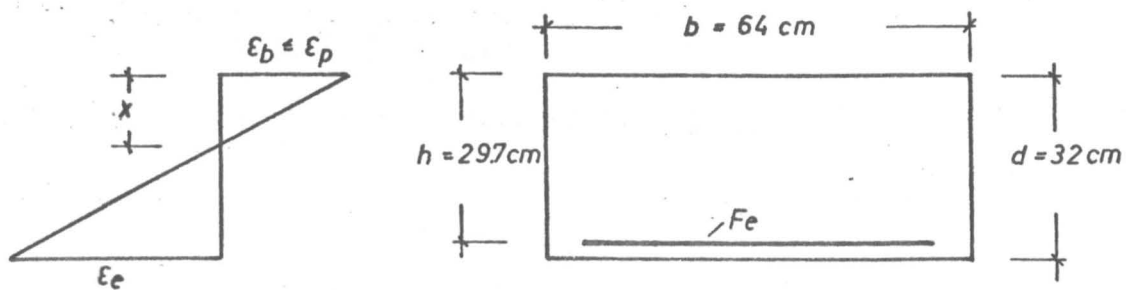
## 2.2 Stahl

Für den Betonstahl St I wird eine bilineare und für den Betonstahl St IIIb nur der elastische Bereich einer bilinearen Spannungs-Dehnungslinie verwendet. Zugversuche an Proben des verwendeten Baustahles St I -  $\varnothing$  16 mm haben die in Tabelle 2 aufgeführten Werte ergeben. Die Betonstähle St I -  $\varnothing$  12 mm und St IIIb -  $\varnothing$  16 mm wurden hinsichtlich ihrer Streckgrenze und Zugfestigkeit nicht untersucht.



## 3. n-freie Berechnung

### 3.1 Dehnungsverteilung im Stahlbetonquerschnitt



### 3.2 Berechnung

Zugkraft im Stahl:

$$Z = \sigma_e \cdot F_e = \begin{cases} \sigma_s \cdot \frac{\epsilon_e}{\epsilon_s} \cdot F_e & \epsilon_e \leq \epsilon_s \\ \sigma_s \cdot F_e & \epsilon_e > \epsilon_s \end{cases}$$

Gleichgewichtsbedingung:

Zugkraft im Stahl  $Z$  = Druckkraft im Beton  $D$

Druckkraft im Beton:

$$D = \alpha \cdot \beta_p \cdot b \cdot x$$

mit  $\alpha$  Völligkeitsbeiwert

$\beta_p$  Prismenfestigkeit:  $\beta_p = 0,85 \beta_w$

$\beta_w$  Würfelfestigkeit

$x$  Höhe der Druckzone:  $x = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_b + \epsilon_e} \cdot h$

Biegemoment:

$$M = [h - x (1 - \kappa)] \sigma_e \cdot F_e$$

mit  $\kappa$  Beiwert für den Schwerpunktabstand der Druckzone von der Nulllinie.

Querschnittsrotation:

$$\theta' = \frac{\epsilon_b}{x} \quad \text{in rad} \cdot \text{cm}^{-1}$$

Rißmoment:

$$M_{\text{RiB}} = \frac{b \cdot d^2}{6} \beta_{bz}$$

mit  $\beta_{bz}$  Biegezugfestigkeit  $\beta_{bz} \approx \frac{1}{7} \cdot \beta_w$

Die Ergebnisse der n-freien Berechnung sind in Tabelle 3, S. 16, angegeben und in Anlage 1 bis 3 und 11 dargestellt. Bei der Stahlbetonplatte 4 wurde der geforderte Bewehrungsgehalt  $\frac{2}{3} \mu_{\text{Grenz}}$  aus der Annahme,

daß im Grenzfall Betonversagen ( $\epsilon_p = 2,2\%$ ) und Fließen des Stahles ( $\epsilon_e = 5\%$ ) mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftreten kann, zu  $\mu_e = 0,64\%$  ermittelt; unter den gegebenen Versuchskörperabmessungen entsprechen diesem Bewehrungsgehalt 6 Stäbe mit  $\varnothing 16$  mm.

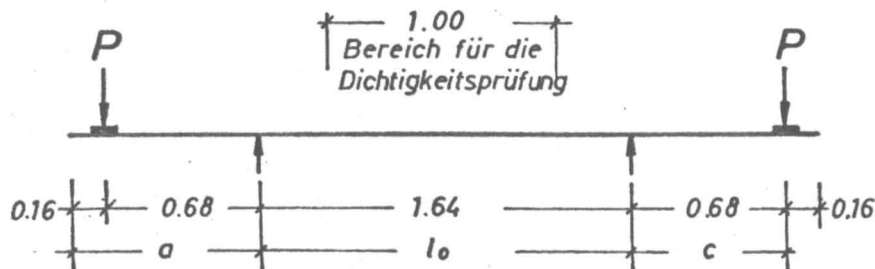
Wie aus Tabelle 3 hervorgeht, unterscheiden sich zum Beispiel bei den Versuchsplatten 3 Rißmoment und das Moment, bei dem die maximale Betonstauchung  $\epsilon_p = 2,2\%$  zu 50% ausgenutzt ist ( $\epsilon_b/\epsilon_p = 0,5$ ), nur um 3%; auch bei den Platten der Serie 1 umfaßt der versuchstechnisch interessierende plastische Bereich weniger als 5% des maximalen Moments. Die Berechnung bestätigt somit nochmals die dem Auftraggeber rechtzeitig mitgeteilten Bedenken gegen die allzu starke Anlehnung (besonders der mit Stahl I bewehrten Platten) an frühere Untersuchungen mit anderer Zielsetzung.



### A3: Versuchsdurchführung

Die Versuchsplatten wurden im Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig hergestellt. In Tabelle 4 sind die Mischungsverhältnisse für den Beton und die erzielten Festigkeiten angegeben. Die Kornzusammensetzung der Zuschlagstoffe entsprach dem besonders guten Bereich nach DIN 1045. Bei der Herstellung der Versuchsplatten wurden jeweils 3 Satz Gütewürfel (Kantenlänge 20 cm) und Betonbalken (Abmessungen 10 x 10 x 50 cm) mit betoniert, an denen die Druck- und Biegezugfestigkeit des erhärteten Betons festgestellt wurde. Die Bewehrungsführung ist auf Anlage 4 dargestellt.

Die Beanspruchung der Versuchsplatten sollte in dem nach der statischen Vorbelastung für die Dichtigkeitsprüfungen vorgesehenen, etwa  $l_0 = 1$  m langen Bereich mit konstantem Biegemoment erfolgen. Als statisches System wurde daher ein Einfeldträger mit zwei Kragarmen gewählt.



Um nicht zusätzlich zu den Verformungen durch das Biegemoment noch Querkrafteinflüsse berücksichtigen zu müssen, wurde die Stützweite auf  $l = l_0 + 2d = 1,00 + 2 \cdot 0,32 = 1,64$  m festgelegt.

Es ergeben sich folgende Beanspruchungen:

1. Moment in Feldmitte infolge Eigengewicht

$$M_{gFm} = g \left( \frac{l_0^2}{8} - \frac{a^2}{2} \right) = 2400 \cdot 0,64 \cdot 0,32 (0,336 - 0,353) = - 8,35 \text{ mkp}$$

2. Moment im Feldbereich infolge der Einzellasten

$$M_p = - P_c = - 0,68 \cdot P$$

3. Moment im Feldbereich infolge der Last-Verteilungsbalken unter den Einzellasten

$$M_{PL} = - 12,25 \cdot 0,68 = - 8,3 \text{ mkp}$$

4. Moment über den Stützen infolge Eigengewicht

$$M_s = - g \frac{a^2}{2} = - 2400 \cdot 0,64 \cdot 0,32 \frac{0,84^2}{2} = - 173 \text{ mkp}$$

$$\text{abgemindert: } M_{Sabgem.} = - 158 \text{ mkp}$$

Die Beanspruchung in Feldmitte beträgt also:

$$M = M_p + M_{gFm} + M_{PL} = - (0,68P + 16,7) \text{ mkp}$$

Die Beanspruchung im Stützenbereich ist um

$$\Delta M = -(158 - 8,4) \approx - 150 \text{ mkp größer als im Feldbereich.}$$

Um die Rißbildung gezielt innerhalb des Feldes zu erhalten, wurden die Platten an der Oberseite (Zugseite) etwa 1 cm tief eingefräßt.

Bei der Versuchsdurchführung wurden folgende Größen gemessen:

1. Durchbiegung in drei Punkten, in Plattenmitte und beidseitig davon im Abstand von 40 cm;
2. Verdrehung der Versuchsplatte am festen Auflager;
3. Rotation des Plattenquerschnitts in Plattenmitte, Meßlänge 12 cm;
4. Betonstauchungen und Stahldehnungen in Plattenmitte in jeweils vier Punkten

Für die Messungen wurden folgende Geräte verwendet:

Zu 1: Die Durchbiegung  $f$  wurde mit sogenannten Rollengeräten, Ablesegenauigkeit 1/10 mm, in den in Anlage 8 skizzierten Punkten gemessen.

Zu 2: Verdrehungsmessung am festen Auflager: Die Verdrehung  $\text{tg } \alpha = \frac{x}{h}$  am festen Auflager wurde mit einer Meßuhr, Ablesegenauigkeit 1/100 mm am Hebelarm  $h = 63 \text{ cm}$  gemessen.

Zu 3: Messung der Rotation eines Querschnitts: Die gegenseitige Verdrehung zweier Querschnitte im Abstand von 12 cm wurde in Plattenmitte mit je Plattenseite drei Meßuhren ermittelt, die auf einer Hilfskonstruktion angeordnet waren.

Zu 4: Messung der Dehnungen: Dehnungsmessungen wurden am Stahl und am Beton der Druckzone mit Setzdehnungsmessern, Ablesegenauigkeit 1/100 ‰ durchgeführt.

Die Anordnung und Anzahl der Meßstellen sowie weitere Einzelheiten zur Versuchsdurchführung sind aus Anlage 5 und aus der Fotobeilage, Anlage 6, zu ersehen.

Die Belastung der Versuchsplatten erfolgte mit hydraulisch gesteuerten Prüfmaschinen in vorgegebenen Laststufen. Nach Einstellen einer weiteren Laststufe wurde bis zur Messung der Verformungen jeweils etwa 5 Minuten gewartet, um eine mögliche Rißentwicklung und die damit verbundenen Spannungsumlagerungen mit zu erfassen. Als Grenzbelastung (Traglast) wird diejenige Belastung angesehen, bei der ohne weitere Laststeigerung die Verformungen ständig wachsen. Da von der Vorstellung ausgegangen wurde, daß die Dichtigkeit

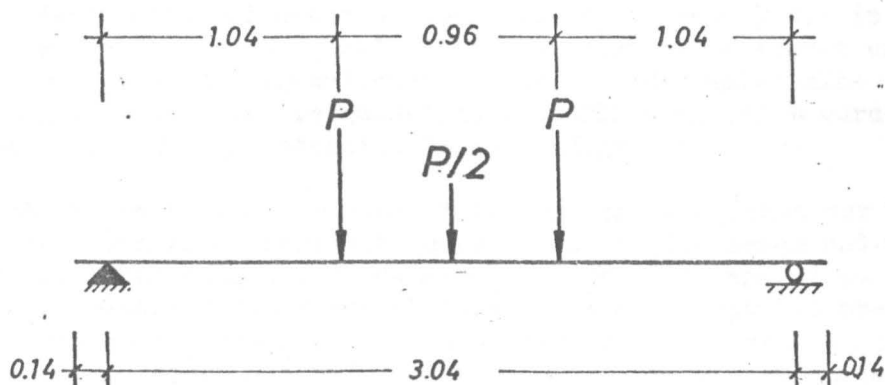
von der Dicke der Druckzone abhängt, sind im Versuchsprogramm bestimmte Werte für die Druckzonendicke vorgegeben worden, vgl. Tabelle 3. Diese Werte können, wenn der Stahl die Fließgrenze überschritten hat, nur durch unterschiedlich lange Beanspruchungsdauer erreicht werden, d. h. im Versuch durch mehrfaches, kurzzeitiges Aufbringen einer Belastung, die nahezu der Bruchlast entspricht, wobei zwischenzeitlich jeweils aus den Meßwerten die noch vorhandene Dicke zu berechnen ist. Wird hierbei die Biegedruckzone soweit eingeschnürt, daß der Beton bis zur Druckfestigkeit beansprucht wird, dann ist mit einem plötzlichen Versagen der Tragfähigkeit zu rechnen, vgl. Platte 1,3 bzw. 1,2.

Zur leichteren Beobachtung der Risse wurden die Platten im Feldbereich eingeschlämmt. Die bereits besprochene Maßnahme, durch Einfräsen der Platten einen Riß in Feldmitte vorzugeben und damit die Rißentwicklung zu beeinflussen, hat nicht in jedem Falle zum Erfolg geführt. Bei einigen Platten entwickelte sich der erste Riß trotzdem neben einem Auflager, also außerhalb des für die Gas- und Wasserdichtigkeitsprüfung vorgesehenen Plattenbereichs. Um ein weiteres Öffnen dieser Risse und das Fließen des Bewehrungsstahles zu verhindern, wurden ggf. die Platten in diesem Bereich mit Stahlbandagen versehen. Die Rißweiten wurden im allgemeinen nicht gemessen.

Im Anschluß an die statische Belastung wurde aus dem Mittelbereich der Versuchsplatte ein 1 m langes Stück, das typische Risse enthielt, herausgeschnitten und dieses als Versuchskörper zur Dichtigkeitsprüfung weitergegeben.

#### A4: Versuchsergebnisse

Der vom Auftraggeber beabsichtigte Vergleich des Verformungsverhaltens zwischen den im Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau (IBS) und den früher an der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) geprüften Platten kann anhand der Durchbiegung in Plattenmitte erfolgen. Vergleichbar ist allerdings nur der in beiden Prüfanstalten untersuchte Plattentyp mit einer Bewehrung aus Betonstahl I - 4  $\varnothing$  16 mm. Für das in der BAM verwendete statische System



gilt im Gegensatz zu dem hier (IBS) verwendeten:

Moment:  $M_{BAM} = P a + \frac{P l}{8} = 1,42 P_{BAM}$

$M_{IBS} = c P = 0,68 P_{IBS}$

Durchbiegung:  $f_{BAM} = \frac{a l^2 P}{8 E I} \left(1 - \frac{4 a^2}{3 l^2}\right) + \frac{l^3 P}{96 E I} = 1,306 \frac{P_{BAM}}{E I}$

$f_{IBS} = \frac{c l^2 P}{8 E I} = 0,2285 \frac{P_{IBS}}{E I}$

Somit gilt das Verhältnis der Durchbiegungen:

$$\frac{f_{BAM}}{f_{IBS}} = \frac{1,306 P_{BAM}}{0,2285 P_{IBS}} = \frac{1,306 \cdot 0,68 \cdot M_{BAM}}{0,2285 \cdot 0,2285 M_{IBS}} = 2,74$$

$M_{BAM} = M_{IBS}$

Das Verhältnis der Durchbiegungen beider Versuchsreihen zeigt eine mehr größenordnungsmäßige als absolute Übereinstimmung mit dem obigen Zahlenwert, da die Verformungen im Fließbereich wesentlich stärker zeitabhängig als lastabhängig sind: In der BAM wurde für die Platten 1.1.1 und 1.1.3 im Momentenbereich von 6,91 Mpm bis 7,12 Mpm eine Durchbiegung von 41,2 mm bis 308 mm gemessen, während im IBS für die 2,74-fache Durchbiegung im Momentenbereich von 5,97 Mpm bis 6,48 Mpm Werte zwischen 21,9 mm und 229 mm erhalten wurden.

Die Versuchsergebnisse für die Dicke der Druckzone  $x$  und die Querschnittsrotation  $\theta$  sind in den Tabellen 5 und 6 zusammengefaßt und auf den Anlagen 7 bis 19 dargestellt. In den Tabellen werden nur die Laststufen angegeben, bei denen die größten Verformungen auftraten; in Tabelle 5 ist angedeutet, daß die angestrebte Dicke der Biegedruckzone infolge des Stahlfließens erst während der Entlastung auf  $M_0 = 0,017 \approx 0,02$  Mpm erreicht wurde. Demgegenüber kann aus den Anlagen das gesamte Verformungsverhalten im Zustand II entnommen werden.

Bei der zur Versuchsplanung durchgeführten  $n$ -freien Rechnung für die Dicke der Biegedruckzone in Abhängigkeit vom Biegemoment, vgl. Abschnitt A2, wurden nur die Biegemomente oberhalb des Rißmomentes betrachtet und außerdem idealisierte Baustoffannahmen für  $\beta_w$  getroffen. Daher ist das Biegemoment nach der Versuchsdurchführung nochmals unter Verwendung der im Versuch ermittelten Verformungen  $\epsilon_b$  und  $\epsilon_e$  in Plattenmitte berechnet und mit in die Anlagen 7 bis 13 eingezeichnet worden. Für die Materialkennwerte  $\epsilon_p$ ,  $\epsilon_s$  und  $\sigma_s$  sowie für die geometrischen Größen  $F_e$  und  $h$  wurden dabei dieselben Werte wie in Abschnitt A2 zugrundegelegt.

Insgesamt ist im Bereich zwischen Rißmoment und Erreichen der Streckgrenze des Stahles eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenem und errechnetem Biegemoment vorhanden, was besonders deutlich in Anlage 11 am Beispiel der Versuchsplatte 4 zum Ausdruck kommt. Unterhalb des Rißmomentes zeigt das Biegemoment als Funktion der Dicke der Druckzone eine in etwa lineare Abnahme, wobei jedoch die halbe Plattendicke  $x_0 = d = 16$  cm (= Spannungsnulllinie im Zustand I) nicht nur bei dem biegemomentenfreien Zustand, sondern auch bei einem endlichen Biegemoment erreicht wird, vgl. Anlage 10. Hierin drückt sich aus, daß bei der  $n$ -freien Berechnung im Zustand I die

Bewehrung und damit die nicht mittige Lage der Spannungsnulllinie unberücksichtigt geblieben ist. Im Versuch ist daher erwartungsgemäß anfänglich auch die Verformung auf der Druckseite größer als auf der Zugseite,

Anhand der Anlagen wird auch sichtbar, welche Schwierigkeiten bestanden, eine bestimmte Dicke der Biegedruckzone im Versuch zu realisieren, vgl. Anlage 8 und 12. Da der Beton trotz gleichmäßigen Stahlfließens sprunghaft aufreißt, ist eine durch ständige Messung kontrollierte Steuerung des Rißvorganges - ohne Verwendung hydraulisch verformungsgesteuerter Prüfmaschinen - nicht möglich.

Die Rißentwicklung wurde im Versuch beobachtet und für die einzelnen Laststufen markiert. Aus dem Rißbild war jedoch kein Rückschluß auf die verbleibende ungerissene Druckzone möglich, da die Rißausläufer (feine Haarrisse) nicht bis zu ihrem Ansatz verfolgt werden können und da außerdem auch die Rißlänge auf den zur Beobachtung verfügbaren Seitenflächen nur bedingt mit der Rißtiefe im Inneren der Versuchskörper übereinstimmen wird. Ein Vergleich der sichtbaren ungerissenen Zone mit der aus der Dehnung errechneten Druckzonenhöhe  $x$  ergab im allgemeinen, daß die Höhe der Druckzone aufgrund des Rißbildes überschätzt wird.

In dem mittleren, für die Dichtigkeitsprüfungen vorgesehenen Bereich traten bei den mit Baustahl I bewehrten Platten normalerweise ein höchstens zwei klaffende Risse auf, deren Breite jedoch ca. 3 mm nicht überstieg, während bei den Platten mit Stahl IIIb und bei der Versuchsplatte 6 mit geripptem Sonderstahl jeweils vier bis fünf Risse in sehr gleichmäßigem Abstand von etwa  $22 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$  bzw.  $19 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$  vorhanden waren. Die Rißweite der vier breitesten Risse betrug bei Platte 6 unter der höchsten Beanspruchung  $0,275 \text{ mm} \pm 0,025 \text{ mm}$ .

Die Meßwerte für die Querschnittsrotation bei den höchsten Laststufen sind in Tabelle 6 zusammengestellt. In den einzelnen Spalten sind folgende Größen aufgeführt:

Spalte 3: Querschnittsverdrehung  $\text{tg } \alpha$  am festen Auflager.

Spalte 4: Verdrehung der Plattenhälften  $\text{tg } \alpha_f = \frac{f}{0,82}$  unter der Annahme, daß sich in Systemmitte bei  $l = 0,82 \text{ m}$  ein klaffender Riß bildet.

Spalte 5: Verdrehung  $\text{tg } \gamma$  zweier Plattenquerschnitte in 12 cm Abstand in Plattenmitte.

Spalte 6: Verdrehung  $\text{tg } \gamma = \frac{20\epsilon_b}{1000x} = \frac{20(\epsilon_e + \epsilon_b)}{1000 \cdot 29,7}$  zweier Plattenquerschnitte in je 10 cm Abstand von der Plattenmitte

Spalte 7: Maximaler Wert der Querschnittsrotation  $\theta$  als Größtwert der folgenden Meßwerte:  $2\alpha$ ,  $2\alpha_f$ ,  $\gamma$ . Hierbei wurde  $\text{tg } \theta = \theta$  in rad (= Bogenlänge/Radius) gesetzt und aufgrund der kleinen Abweichungen anstelle der Bogenlänge die gemessene Sehnenlänge eingeführt.

Eine Querschnittsverdrehung der Rißufer von  $\theta = 2\alpha$  bzw.  $\theta = 2\alpha_f$  tritt ein, wenn ein einziger Riß in der Mitte der Versuchsplatte entsteht. Sofern sich dieser Riß außerhalb der Plattenmitte bildet, kann die maximale Rotation kleiner oder größer als der Wert in Feldmitte sein, je nachdem ob der Riß weiter entfernt oder näher am festen Auflager, daß als Bezugspunkt für die Messung des Winkels  $\alpha$  diente, liegt. Bei einem ungerissenen Prüfkörper bildet sich eine kreisbogenförmige Verformung aus, wobei die maximale Querschnittsrotation  $\theta$  über einem Auflager doppelt so groß ist wie der Sehnen-

winkel  $\alpha_f$ . Da im allgemeinen aus Gründen des Aufwandes bei den mit Stahl I bewehrten Prüfkörpern die Lage der klaffenden Risse in Abhängigkeit vom Auflagerabstand oder die Querschnittsverdrehung der Rißufer und bei den mit Stahl IIb bewehrten Versuchsplatten die Rißweite und -verteilung nicht ermittelt wurden, kann als Maß für die maximale Biegerotation  $\theta$  nur der Höchstwert aus Verdrehung, Durchbiegung und Dehnung ermittelten Rotation angesehen werden.

Dieser in Spalte 7 angegebene Wert, zu dem also an nicht näher bekannten Stellen ein oder mehrere Risse unbekannter Breite und Tiefe gehören, wurde in Teil B verwendet, um die Dichtigkeit in Abhängigkeit von der Biegerotation zu charakterisieren.



Tabelle 1: Zusammenstellung der zur Prüfung vorgeschlagenen Stahlbetonplatten

Versuchsplatte	Stahlsorte	Betongüte	Bewehrungsgehalt $\mu_e$ %	Bewehrung
1.1	St I	Bn 250	0,42	4 Ø 16
1.2	St I	Bn 250	0,42	4 Ø 16
1.3	St I	Bn 250	0,42	4 Ø 16
1.4	St I	Bn 250	0,42	4 Ø 16
3.1	St I	Bn 200	0,24	4 Ø 12
3.2	St I	Bn 200	0,24	4 Ø 12
3.3	St I	Bn 200	0,24	4 Ø 12
3.4	St I	Bn 200	0,24	4 Ø 12
4.	St IIIb	Bn 250	$2/3 \mu_{\text{grenz}} = 0,64$	6 Ø 16
5.1	St IIIb	Bn 250	0,24	4 Ø 12
5.2	St IIIb	Bn 250	0,24	4 Ø 12
6.	St I gerippt	Bn 250	0,42	4 Ø 16

irrtümlich mit  
6 Ø 12 mm  
hergestellt

Bemerkung: Auf ursprünglich vorgesehene Platten einer Serie 2 (St I - 4 Ø 16 mm - Bn 200) wurde zugunsten von Wiederholungsmessungen verzichtet.

Tabelle 2: Baustahl I - Ø 16 mm - Versuchsergebnisse

Probe	Durchmesser Ø	Querschnitt $F_e$	Bruchdehnung $\epsilon_u$	Streckgrenze $\sigma_s$	Zugfestigkeit $\sigma_z$
	mm	cm <sup>2</sup>	%	kp/cm <sup>2</sup>	kp/cm <sup>2</sup>
St I	16,2	2,061	33,8	2790	3663
Ø 16	16,2	2,061	34,4	2741	3736
	16,2	2,061	35,0	2756	3726
Mittelwert			34,4	2762	3708



Tabelle 3: Verformungsverhalten bei Biegebeanspruchung im Zustand II

Versuchsplatte	$\epsilon_b/\epsilon_p$	$\epsilon_b$	$\epsilon_e$	$\epsilon_e/\epsilon_s$	$\alpha$	$\kappa$	$x$	$D$	$M$	$\theta \cdot 10^4$
		%	%				cm	MP	Mpcm	cm <sup>-1</sup>
1.1 bis 1.4 und 6 St I $\beta_w = 300 \text{ kp/cm}^2$							Rißmoment	4,68		
	0,20	0,44	1,33	1,01	0,187	0,661	7,37	22,5	6,11	0,597
	0,25	0,55	2,16	1,64	0,229	0,659	6,02	22,5	6,22	0,914
	0,30	0,66	3,18	2,42	0,270	0,657	5,11	22,5	6,29	1,292
	0,40	0,88	5,70	4,32	0,347	0,654	3,97	22,5	6,37	2,217
	0,50	1,10	8,80	6,67	0,417	0,650	3,30	22,5	6,42	3,333
3.1 bis 3.4 St I $\beta_w = 225 \text{ kp/cm}^2$							Rißmoment	3,50		
	0,20	0,44	1,96	1,48	0,187	0,661	5,46	12,5	3,47	0,806
	0,25	0,55	3,12	2,36	0,229	0,659	4,45	12,5	3,51	1,236
	0,30	0,66	4,53	3,43	0,270	0,657	3,78	12,5	3,54	1,746
	0,40	0,88	8,02	6,08	0,347	0,654	2,94	12,5	3,58	2,993
	0,50	1,10	12,24	9,27	0,417	0,650	2,45	12,5	3,60	4,490
4 St IIIB $\beta_w = 300 \text{ kp/cm}^2$							Rißmoment	4,68		
	0,20	0,44	1,06	0,40	0,187	0,661	8,73	26,8	7,17	0,504
	0,25	0,55	1,30	0,50	0,229	0,659	8,80	32,9	8,79	0,625
	0,30	0,66	1,54	0,59	0,270	0,657	8,90	39,0	10,40	0,742
	0,40	0,88	2,01	0,77	0,347	0,654	9,04	51,2	13,59	0,973
	0,50	1,10	2,47	0,94	0,417	0,650	9,15	62,5	16,55	1,202
5.1 und 5.2 St IIIB $\beta_w = 300 \text{ kp/cm}^2$							Rißmoment	4,68		
	0,20	0,44	1,85	0,71	0,187	0,661	5,71	17,5	4,85	0,771
	0,25	0,55	2,28	0,87	0,229	0,659	5,77	21,7	6,00	0,953
	0,30	0,66	2,82	1,08	0,270	0,657	5,64	24,9	6,91	1,170
	0,40	0,88	5,06	1,93	0,347	0,650	4,40	24,9	7,01	2,001
	0,50	1,10	7,83	2,99	0,417	0,650	6,33	24,9	7,07	3,006

Erläuterung:

- $\epsilon_b$  : Betonstauchung
- $\epsilon_p$  : Betonstauchung bei der Prismenfestigkeit  $\beta_p = 0,85 \beta_w$ ;  $\epsilon_p = 2,2\%$
- $\epsilon_e$  : Stahldehnung
- $\epsilon_s$  : Stahldehnung a. d. Streckgrenze
- $\alpha$  : Völligkeitsbeiwert
- $\kappa$  : Ausmittigkeitsbeiwert der Druckzone
- $x$  : Dicke der Druckzone
- $D$  : Betondruckkraft
- $M$  : Biegemoment
- $\theta$  : Querschnittsrotation

Tabelle 4: Mischungsverhältnisse, Frischbetoneigenschaften und Betonfestigkeit

Versuchsplatte Nr.	Zement- gehalt kg/m <sup>3</sup>	Z:K:W	Zuschlagstoffe in Gew.-% - Korngruppen -					Frisch- beton- Rohdichte kg/dm <sup>3</sup>	Ausbreit- maß cm	Prüfalter Tage	Betonfestigkeit	
			0/1	1/3	3/7	7/15	15/30				Würfelfestig- keit kp/cm <sup>2</sup>	Biegezugfestig- keit kp/cm <sup>2</sup>
1.1	239	1:8,13:0,80	3	32	19	29	17	2,39	38,5	37	319	-
1.2	239	1:8,13:0,80	3	32	19	29	17	2,39	38,5	48	262	-
1.3	218	1:9,08:0,80	9,6	25,4	19	29	17	2,40	37,5	113	326	36,9
1.4	218	1:9,08:0,80	9,6	25,4	19	29	17	2,40	37,5	76	294	33,7
3.1	170	1:12,12:0,88	8,2	24,7	21,5	18,5	27,1	2,43	37,0	91	235	35,9
3.2	170	1:12,12:0,88	8,2	24,7	21,5	18,5	27,1	2,43	37,0	31	160	-
3.3	149	1:13,85:1,14	16,5	16,5	21,5	18,5	27,1	2,42	37,0	71	210	-
3.4	149	1:13,85:1,14	16,5	16,5	21,5	18,5	27,1	2,42	37,0	69	184	-
4	218	1:9,08:0,80	9,6	25,4	19	29	17	2,39	37,5	93	315	30,1
5.1	218	1:9,08:0,80	9,6	25,4	19	29	17	2,40	37,5	85	351	45,8
5.2	218	1:9,08:0,80	9,6	25,4	19	29	17	2,40	37,5	91	361	-
6	218	1:9,08:0,80	9,6	25,4	19	29	17	2,40	37,5	118	314	34,1

**Tabelle 5:** Meßergebnisse: Maximale Beton- und Stahldehnung sowie Höhe der Druckzone

Versuchsplatte Nr.	M. Mpm	$\epsilon_b$ ‰	$\epsilon_e$ ‰	h cm	x cm
1.1	6,48 6,31 5,97 0,02	- 0,570 1,350 -	- 1,203 12,8 -	- 30,1 30,1 -	- 9,676 2,87 -
1.2	6,14 5,97 0,02	- 1,567 0,667	- 12,378 10,3	- 30,7 -	- 3,449 1,84
1.3	6,14 6,04 0,02	- 0,54 0,13	- 1,195 0,328	- 30,2 30,2	- 9,30 8,60
1.4	6,48 5,63 0,02	- 0,645 0,257	- 2,462 1,692	- 30,45 30,45	- 6,321 4,015
3.1	5,80 5,46 0,02	- 0,645 0,225	- 1,478 0,375	- 30,15 30,15	- 9,2 11,3
3.2	6,38 6,34 0,02	- 0,74 0,185	- 1,495 0,258	- 29,9 29,9	- 9,9 12,5
3.3	4,10 3,76 0,02	- 0,488 0,110	- 1,390 0,425	- 30,3 30,3	- 7,873 6,23
3.4	4,44 3,76 0,02	- 0,515 0,138	- 1,173 0,223	- 30,1 30,1	- 9,48 11,51
4	14,62 0,02	1,262 0,352	3,077 0,99	30,3 30,3	8,812 7,947
5.1	5,80 0,02	0,727 0,245	3,76 1,75	30,1 30,1	4,876 3,696
5.2	5,97 0,02	0,9 0,405	5,64 3,448	30,05 30,05	4,13 3,16
6	6,48 6,14 0,02	- 0,56 0,12	- 1,55 0,32	- 30,2 30,2	- 8,02 8,24

**Tabelle 6:** Meßergebnisse: Gemessene Querschnittsrotation

Versuchsplatte Nr.	Biegemoment Mpm	R o t a t i o n				Größtwert $\theta$ in rad
		am festen Auflager $\text{tg } \alpha$	Durchbiegung $\text{tg } \alpha_f$	Verdrehung $\text{tg } \varphi$	- Plattenmitte - Verformung $\text{tg } \gamma$	
1	2	3	4	5	6	7
1.1	6,31 0,017	0,01168 0,01740	0,00914 -	0,00105 0,00116	0,00119 -	0,0234 (0,0348)
1.2	5,97 0,017	0,01535 0,00890	0,01018 -	0,00155 0,00103	0,00908 0,00714	0,0307 -
1.3	6,05 0,017	0,00645 0,00249	0,00768 -	0,00430 0,00174	0,00111 0,00031	0,0154 -
1.4	6,48 0,017	0,00550 0,00178	- -	0,00503 0,00761	0,00113 0,00131	0,0110 -
3.1	5,46 0,017	0,00686 0,00271	0,00317 -	0,00942 0,00156	0,00142 0,00040	0,0137 -
3.2	6,34 0,017	0,00906 0,00427	0,00463 -	0,01223 0,00392	0,00150 0,00029	0,0181 -
3.3	3,76 0,017	0,01386 0,01042	0,00182 -	0,00650 0,00572	0,00126 0,00036	0,0277 -
3.4	3,76 0,017	0,01195 0,00955	0,00073 -	0,00108 9,00017	0,00113 0,00024	0,0239 -
4	14,62 0,017	0,01124 0,00301	0,00548 -	0,01092 0,01114	0,00292 0,00090	0,0225 -
5.1	5,80 0,017	0,00879 0,00322	0,00304 -	0,02841 0,01272	0,00302 0,00134	0,0176 -
5.2	5,97 0,017	0,01355 0,00717	0,00585 -	0,03678 0,02467	0,00440 0,00259	0,0271 -
6	6,14 0,017	0,00620 0,00244	0,00134 -	0,01298 0,00363	0,001'3 0,00029	0,0124 -

Erläuterung zu Tabelle 6 siehe 13

### 3. Teil B: Untersuchung der Gas- und Wasserdichtigkeit

#### B1: Einleitung

Vergleichbare Untersuchungen der Gas- und Wasserdichtigkeit statisch vorbelasteter Betonbauteile sind bisher noch nicht durchgeführt worden. Daher war auch bei der Festlegung der Prüfbedingungen und der Versuchsdurchführung eine Anlehnung an die Literatur nur in begrenztem Maße möglich. Für die Konstruktion des kombinierten Prüfstandes zur Durchführung der Gas- und Wasserdichtigkeit lagen überhaupt keine Erfahrungen vor.

Mit der Wasser- und auch Luftdurchlässigkeit haben sich Graf und Walz eingehend befaßt /1/2/ und damit die Grundlage für die heute übliche Prüfung der Wasserdurchlässigkeit nach DIN 1048 gelegt. Wesentlich an diesem Verfahren ist, daß die Prüfkörper mit hohem Druck, 1, 3 und 7 atü, über lange Zeit, insgesamt 96 Stunden, beansprucht werden und die Beurteilung nach Augenschein anhand des Grades der Durchfeuchtung an der Luftseite vorgenommen wird. Demgegenüber wird die Wasserdichtheit von Rohren und Formstücken aus Beton nach DIN 4032 mit relativ geringem Druck, 0,1 bis 0,5 atü, über kurze Zeit, insgesamt 30 Minuten, geprüft und aufgrund der in dieser Zeit aufgenommen Wassermenge - zulässig sind maximal  $1,4 \text{ cm}^3$  je  $\text{dm}^2$  Oberfläche - beurteilt.

Nach Untersuchungen von Walz gibt es keine eindeutige Beziehung zwischen Wasseraufnahme und Wasserdurchlässigkeit. Das ist verständlich, da die Wasseraufnahme durch Kapillarkräfte erfolgt; trockener Beton nimmt immer Wasser auf und bindet es. Demgegenüber ist die Wasserdurchlässigkeit als ein reiner Durchströmungsvorgang zu verstehen. Wasserundurchlässigkeit, Wasserdichtheit oder Dichtigkeit ist deshalb eine Begrenzung der Eindringtiefe von Druckwasser durch Sättigung und damit Abbau des kapillaren Saugvermögens. Üblicherweise beschreibt man das Wassereindringverhalten nach DIN 1048 nicht durch die Wassereindringzahl, was aufgrund der durchgeführten Untersuchungen nahegelegt wird, sondern durch die Eindringtiefe, die erfahrungsgemäß großen örtlichen Streuungen unterliegt.

Bisher ist es offenbar noch nicht gelungen, einen gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen Wasser- und Luftdurchlässigkeit für normaldichten Beton herzustellen /2/3/, was in Anbetracht der komplexen Transportvorgänge nicht verwundert.

Prüfverfahren zur Bestimmung der Gasdichtigkeit (Luft) sind in DIN 18 160 für Hausschornsteine und in DIN 52 213 für Schallabsorptionsmaterialien genormt. In DIN 18 160, Blatt 6, ist festgelegt, daß bei einem Prüfdruck von 4 mmWS während der Prüfdauer von einer Minute die Strömungsgeschwindigkeit pro  $1 \text{ dm}^2$  innerer Oberfläche nicht mehr als  $30 \text{ cm}^3$  pro Sekunde betragen darf. Diese Anforderungen sind minimal und können daher nicht als Richtlinie für die durchgeführten Untersuchungen verwendet werden. Auch in DIN 52 213 wird ein stationärer Strömungsvorgang zur Bestimmung des Strömungswiderstandes, d. i. das Verhältnis von Überdruck zu Strömungsgeschwindigkeit, benutzt. Ursprünglich war geplant, dieses Verfahren bei den Untersuchungen anzuwenden. Bei nahezu intakter Biegedruckzone der geprüften Stahlbetonplattenstreifen ist die Strömungsgeschwindigkeit jedoch - selbst bei einem Luftdruck von 500 mmWS - noch so klein, daß keine stationäre Luftdurchströmung erreicht wird. Für die Beurteilung der Gasdichtigkeit wurde daher der Druckabfall im Prüfraum in Abhängigkeit von der Zeit verwendet.



Für die Gasdichtigkeit war ein Prüfdruck von 500 mmWS über zwei Stunden und anschließend ein Prüfdruck von 25 mmWS über 10 Stunden erwünscht. Diese Forderung setzt eine einfache Möglichkeit zur Kompensation der Luftdruckschwankungen voraus, die jedoch nicht gegeben war. Es wurde daraufhin als Prüfgröße der Luftdruckabfall um einen bestimmten Betrag als Funktion der Zeit oder der Druckabfall innerhalb einer bestimmten Zeit, ausgehend von den Anfangsüberdrücken 500 mmWS, 320 mmWS, 200 mmWS, 125 mmWS, 80 mmWS und 50 mmWS, vereinbart. Die letztgenannten kleineren Werte sollten dabei nur berücksichtigt werden, wenn eine Verfälschung der Druckabnahme durch Temperatur oder atmosphärische Druckeinflüsse auszuschließen war.

Die Prüfung der Wasserdichtigkeit sollte sich an DIN 4032 anlehnen, das heißt, es war die während der Beobachtungszeit aufgenommene Wassermenge zu ermitteln. Bis auf die Abdichtung des Prüfstandes ergaben sich bei der Wasserdichtigkeitsprüfung keinerlei Schwierigkeiten, so daß zur Verbesserung der Aussagegenauigkeit die Prüfdauer bei 5 mWS Druck von 8 auf 24 Stunden verlängert wurde.

## B2: Beschreibung des Prüfstandes zur Bestimmung der Gas- und Wasserdichtigkeit

Der Prüfstand besteht im wesentlichen aus einer Stahlplatte mit einer rechteckigen Aussparung von etwa 60 % der Prüfkörperfläche, auf der die Versuchskörper in einem Mörtelbett gelagert und gegenüber der Durchtrittsfläche durch Bitumenanstriche abgedichtet werden. Über den Prüfkörper greift eine gas- und wasserdichte sowie verwindungssteife Haubenkonstruktion mit einem breiten Flansch, der dicht an die Grundplatte anschließt.

An ein und demselben Prüfkörper sollte sowohl die Prüfung der Gasdichtigkeit als auch die Prüfung der Wasserdichtigkeit durchgeführt werden; daher war eine Druckfestigkeit des Prüfstandes von 0,7 atü zu fordern. Die Versuchskörper hatten aufgrund ihrer Abmessungen von 1,0 x 0,64 x 0,32 m ein Volumen von 0,2 m<sup>3</sup> und ein Gewicht von etwa 500 kp, so daß sich die Verwendung eines Kranes zum Aufsetzen der Prüfkörper als notwendig erwies. An die Dichtigkeit des Prüfstandes mußten hohe Anforderungen gestellt werden, da erwartet wurde, daß ein Großteil der Versuchskörper keine wesentliche Undichtigkeit aufweist. Es wurde angestrebt, bei abgedichteter Durchtrittsfläche einen Prüfdruck von 500 mmWS etwa über eine Zeitdauer von einer Stunde ohne meßbaren Druckverlust im Prüfraum zu halten. Zur Herstellung des Prüfbehälters eignen sich nur Werkstoffe, die dicht geschweißt werden können, also Stahl oder Kunststoff. Aufgrund der Durchbiegungsbeschränkungen hätte eine Stahlkonstruktion einen zu großen Aufwand erfordert; daher wurde zugunsten einer kombinierten Kunststoff-Holzkonstruktion mit Versteifungsträgern entschieden.

Eine Beschränkung der Durchbiegung ist nicht nur wegen der Überschreitung der zulässigen Spannungen, sondern vor allem aus Gründen der Meßgenauigkeit erforderlich. Wie eine Abschätzung zeigt, ist im Bereich zwischen 0 und 100 mmWS auch bei einer Durchbiegung von nur 0,1 mm noch ein Einfluß auf die Meßgenauigkeit zu erwarten. Beim Aufbringen des Prüfdruckes wird vorwiegend die Haube deformiert; diese Volumenänderung des Prüfraumes führt zu einem momentanen Absinken des Luftdruckes in der Haube und muß mit dem Überdruck kompensiert werden. Falls sich jedoch während des Prüfvorganges der atmosphärische Druck ändert,

beipielweise abnimmt, so wird statt des eingestellten Anfangsdruckes ein höherer Überdruck registriert, der aber nur bei unendlich steifem Prüfstand in seiner wahren Größe meßbar ist.

Im Hinblick auf die Wasserdichtheitsprüfung kommt einer Durchbiegungsbeschränkung des Prüfstandes bzw. der Haube eine andere Bedeutung zu. Der Arbeitsdruck von 0,5 atü erfordert hier eine biegesteife Ausführung besonders im Bereich des Fugenstoßes zwischen Haubenkonstruktion und Grundplatte. Da der Prüfstand bereits mehrere Tage vor dem Aufbringen des Wasserdruckes zur Durchführung der Gasdichtheitsprüfung und zur drucklosen Wasserlagerung der Versuchskörper geschlossen werden muß, waren hier hohe Anforderungen an die Dichtungsmittel zu stellen, zumal ein Aufbiegen des Haubenflansches unter Druck nicht immer verhindert werden konnte.

Der Prüfstand bestand aus drei wesentlichen Teilen:

1. Grundplatte zur Lagerung der Versuchskörper
2. Haubenkonstruktion mit luft- und wasserdichtem Anschluß gegen die Grundplatte
3. Auffangbehälter unterhalb der Grundplatte

Die 20 mm dicke,  $1,4 \times 1,1 \text{ m}^2$  große Grundplatte aus Stahl wurde 80 cm über dem Boden in bequemer Arbeitshöhe auf vier Füßen gelagert. Um einen dichten Anschluß der Haubenkonstruktion zu gewährleisten, wurde auf der Stahlplatte eine 20 mm dicke PVC-Platte im Mörtelbett verlegt. Beide Platten besaßen einen etwa  $0,92 \times 0,56 \text{ m}^2$  großen Ausschnitt, durch den der Wasserauffangbehälter aus 8 mm dickem PVC-Transparent geführt wurde, der eine einfache Beobachtung der Prüfkörperunterseite (Biegedruckseite) ermöglicht. Der Boden des Auffangbehälters war ausgebeult und an der tiefsten Stelle mit einer Abflußöffnung versehen.

Die Haube, die bei aufgelegtem Versuchskörper den Prüfraum bildet, wurde aus 8 mm dickem PVC-schlagfest MZ zusammengeschweißt; die Innenmaße des Prüfraumes betrugen  $1105 \times 507 \times 745 \text{ mm}^3$ . Die Gestaltung der oberen Fläche erfolgte in Form eines Satteldaches, wobei im First die Anschlüsse für Druckluft und Wasser sowie die Entlüftung angeordnet wurde. Den unteren Anschluß bildete der 5 cm breite Flansch, auf dem die Dichtung, Moosgummi-streifen mit aufgeklebter 8 mm dicker Rundschnur, befestigt war. Zur Druckverteilung erhielt die Haube einen Mantel aus 4 cm dicken Holzbohlen. Die Seitenteile des Mantels wurden fest untereinander verschraubt. Die zweiteilige Bohlenabdeckung wurde hingegen bei jedem Aufsetzen der Haube über einen Prüfkörper separat aufgebracht, um Spannungsunterschiede in verschiedenen Teilen der Kunststoffhaube, die erfahrungsgemäß schnell zu Rissen führten, zu vermeiden.

Zum Andruck des Holzmantels an die Haube und insbesondere zur kraftschlüssigen Verbindung der Prüphaube mit der Grundplatte dienten in Querrichtung vier Rahmen aus 70 mm U-Stahl und in Längsrichtung zwei Zugstangen. Die Verschraubung der Rahmen und anderen Halterungen mit der Grundplatte erfolgte an speziellen Anschlußösen und einer umlaufenden Winkelstahlschiene, die ggf. auch aus der Haube tretendes Wasser zurückhalten konnte.

Die Konstruktion des Prüfstandes ist aus Anlage 1 ersichtlich.



Bei den ersten Probeuntersuchungen ergaben sich Schwierigkeiten, den Prüfstand hinreichend gut abzudichten, wobei es im allgemeinen leichter war, eine gute Dichtigkeit gegen den relativ geringen Luftdruck als gegen den Wasserdruck zu erzielen. Die Abdichtung der Haube gegen den Prüfstand gelang am besten mit aufgeklebtem (Pattex) Moosgummi-Profilen, die selbst hergestellt wurden. Allerdings verliert Moosgummi nach einer Beanspruchungsdauer von etwa 200 Stunden seine Rückverformbarkeit. Bituminiertes Moltopren, unprofilierte Moosgummidichtungen und Dichtungskitte erwiesen sich als unbrauchbar, selbst wenn sie durch zusätzliche Fettschichten ergänzt wurden. Die Abdeckhaube brach mehrfach an den PVC-Schweißnähten, worauf aus den Haarrissen Wasser drang. Daher wurden die hochbeanspruchten Kanten innenseitig mit Karosserie-Unterbodenschutz verkleidet.

Ein grundlegender Mangel des Prüfstandes bestand in seiner relativ biegeweichen Konstruktion. Für eine Neukonstruktion sollte eine maximale Verformung von 0,01 mm gefordert werden. Insbesondere erwies sich der mehrschichtige Aufbau der Unterkonstruktion - Stahlgrundplatte, Mörtelbett, PVC-Platte - als eine Quelle möglicher Undichtigkeit.

Der für die Wasserdichtigkeitsuntersuchungen erforderliche Prüfdruck von 1, 3 und 5 mWS wurde durch eine Wassersäule erzeugt, in dem ein etwa 70 l fassender, mit dem Prüfstand durch einen Schlauch von 6 cm<sup>2</sup> Querschnitt verbundener Behälter jeweils in entsprechender Höhe über der Versuchskörper-Oberfläche aufgestellt wurde.

Die Messung der vom Prüfkörper aufgenommenen Wassermenge erfolgte auf einfache Weise durch Messung der Höhenänderung des Wasserspiegels im Behälter, wobei aufgrund der Behälterabmessungen im Durchschnitt einer Absenkung des Wasserspiegels um 11 mm eine Wassermenge von 1 l bedeutete. Bei der Ablesung des Wasserstandes wurden jeweils Marken am Wasserbehälter angebracht, und diese nach Versuchsende durch Auffüllen der verbrauchten Wassermenge geeicht. Die Genauigkeit dieser Registrierung liegt bei  $\pm 0,05$  l und wurde als ausreichend erachtet, zumal ggf. durch eine Verlängerung der Beobachtungsdauer die relative Meßunsicherheit einfach herabgesetzt werden konnte. Die durchschnittlich verbrauchten Wassermengen bewirkten einen Druckabfall von weniger als 80 mmWS, so daß auf einen Druckausgleich während der Prüfungen verzichtet wurde.

Bei den Gasdichtigkeits-Untersuchungen erfolgte die Erzeugung des Überdruckes im Prüfraum von einer Preßluft-Druckflasche aus, über handelsübliche Reduzierventile. Das Aufbringen des Überdruckes wurde so langsam als möglich vorgenommen, um eine Temperaturänderung der Luft durch Entspannung zu vermeiden. Für die Messung des Druckabfalles wurden induktive Druckaufnehmer der Firma Hottinger, Type P1/91, in Verbindung mit einer Meßbrücke der Type KWS und zur Registrierung des Druckpegels  $L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0}$  ein Pegelschreiber Type 2305 der Fa. Brüel & Kjaer verwendet. Die Druckmeßdose war an der Vorderseite des Prüfstandes etwa in halber Höhe des Versuchskörpers eingelassen.

Eine angestrebte Luftdruckmessung und -kompensation unter Verwendung einer zweiten Druckmeßdose konnte nicht verwirklicht werden, da es nicht gelang, Meßwertunterschiede zwischen diesem "induktiven Barometer" und einem Präzisions-Quecksilberbarometer aufzuklären.

Eine Verfälschung der Meßwerte durch mangelhafte zeitliche Konstanz (Drift) der Gleichspannungsverstärker in Meßbrücke und Pegelschreiber war nicht zu befürchten, wie durch Vorversuche festgestellt wurde.

### B3: Gasdichtigkeit biegebeanspruchter Stahlbeton-Plattenstreifen

#### B3.1: Kennzeichnung der Gasdichtigkeit

Wie bereits erwähnt, wurde bei der Gasdichtigkeitsprüfung im Gegensatz zur Untersuchung der Wasserdichtigkeit ein instationärer Vorgang, nämlich der Druckabfall als Funktion der Zeit beobachtet. Es wurde festgestellt, daß die Meßgröße, der Logarithmus des Überdruckes, bei konstantem Luftdruck linear mit der Zeit abnimmt; also ist die zeitliche Änderung des Behälterdruckes proportional dem momentan vorhandenen Überdruck:

$$\frac{dp_i}{dt} \sim p_i - p_{ao} \rightarrow p_i - p_{ao} = (p_i(0) - p_{ao}) e^{-t/\tau} = p_{ü} e^{-t/\tau}$$

Als Größen zur Kennzeichnung der Dichtigkeit bieten sich daher sowohl die Pegeländerung pro Zeiteinheit  $\Delta L/\Delta t$  in dB/h als auch die Abklingkonstante  $\tau$  in h für den Druckabfall auf den e-ten Teil eines beliebigen Anfangsdruckes an. Beide Größen sind in Tabelle 1 als Meßergebnisse für die Gasdichtigkeit angegeben.

Um den Druckabfall im Prüfbehälter bei den verschiedenen vorgegebenen Werten für den Überdruck zu ermitteln, bedarf es nur eines einzigen Versuches: Beginnend mit einem genügend hohen Anfangsüberdruck, z.B. 500 mmWS, registriert man solange den Druckabfall bis der Druckausgleich mit der Umgebung erfolgt ist. Die gesuchten Einzelwerte erhält man dann als Tangenten an die Druckkurve bei den gewünschten Überdruckwerten, z.B. 500 mmWS, 320 mmWS, 200 mmWS usw. Dieses Verfahren setzt jedoch - besonders bei großer Dichtigkeit - ausreichend zeitstabile Meß- und Registriereinrichtungen sowie konstanten Luftdruck voraus.

Bei Luftdruckschwankungen, die erfahrungsgemäß im zeitlichen Mittel etwa 1 Torr/h betragen, sind keine hinreichend genauen Messungen mehr möglich. Als Beispiel ist diesem Bericht Anlage 3 beigelegt, in der der Druckabfall bei 500 mmWS und bei 125 mmWS über längere Zeit dargestellt ist. Wie ersichtlich ist, waren die Schwankungen des atmosphärischen Druckes während der Meßdauer gering; trotzdem führten sie bereits bei 125 mmWS zu einer Unsicherheit in der Abklingkonstanten von etwa 50%.

Eine wichtige Größe zur Kennzeichnung der Gasdichtigkeit ist die den Prüfkörper stationär durchströmende Luftmenge. Diese Größe konnte jedoch nicht im Versuch ermittelt werden, da der Mengenstrom bis auf Versuchskörper 1.2 geringer war als  $1 \text{ cm}^3/\text{s}$ , der kleinste mit dem Rotameter meßbare Wert. Daher wird im folgenden die stationäre Gasdurchlässigkeit aus dem gemessenen Druckabfall abgeschätzt. Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Ergebnisse ist, daß überhaupt eine stationäre Strömung durch den Prüfkörper hindurch - und nicht etwa entlang von Undichtigkeiten des Prüfstandes - erfolgt. Insofern kann die Gültigkeit der Überlegung zunächst nur für den Prüfkörper 1.2 als wahrscheinlich unterstellt werden.

$$\text{Die Kontinuitätsgleichung } \frac{dM_V}{dt} = - \frac{dM_K}{dt}$$

beschreibt das Gleichgewicht zwischen der zeitlichen Änderung der Gasmenge  $M_V$  im Prüfbehälter und der durch "eine Kapillare" aus dem Behälter getretenen Menge  $M_K$ . Setzt man für  $M_V$  die Zustandsgleichung für ein ideales Gas

$$M_V = \frac{m}{RT} \cdot p_i \cdot V$$

mit	m	Molekulargewicht; für Luft $m=29$ g/Mol
	R	Gaskonstante; $R = 83,1 \frac{\text{kp} \cdot \text{cm}}{\text{Mol} \cdot \text{K}}$
	T	absolute Temperatur $\approx 293^\circ \text{K}$
	$p_i$	Druck im Behälter, z.B. 1,05 kp je $\text{cm}^2$ bei $p_u=500$ mmWS
	V	Luftvolumen des Prüfraumes = Behältervolumen - Prüfkörpervolumen $> 2 \cdot 10^5 \text{cm}^3$ . Das effektive Volumen eines gerissenen Versuchskörpers ist nicht bekannt.

und für  $M_K$  die Hagen-Poiseuillesche Gleichung

$$M_K = \frac{\rho}{r} \cdot t (p_i - p_a)$$

mit	$\rho$	Dichte der Luft: $1,293 \cdot 10^{-3}$ g/cm <sup>3</sup>
	$p_a$	konstanter atmosphärischer Druck, z.B. 1 kp/cm <sup>2</sup>
	t	Zeit in Sekunden
	r	Strömungswiderstand in $\text{kp} \cdot \text{s}/\text{cm}^5$
		z.B. Kapillare mit Kreisquerschnitt: $r_o = \frac{8 l}{\pi R^4} \cdot \eta$
		Kapillare mit Rechteckquerschnitt: $r_{\square} = \frac{12 l}{B T^3} \cdot \eta$
		wobei l die Länge, R den Radius und B die Breite bzw. T die Weite der Kapillare sowie $\eta$ die Viskosität der Luft bedeuten,

dann erhält man

$$\frac{m}{RT} \cdot \frac{d(p_i V)}{dt} = - \frac{\rho}{r} (p_i - p_a).$$

oder

$$\frac{mr}{RT\rho} \left( V \frac{dp_i}{dt} + p_i \frac{dV}{dt} \right) = -(p_i - p_a).$$

Stellt man sich vor, daß der Druck im Behälter durch ständige Volumenverkleinerung aufrechterhalten würde ( $\frac{dp}{dt} = 0$ ), so ergibt sich ein stationärer Abfluß aus dem Behälter gemäß:

$$\frac{mr}{RT\rho} p_i \frac{dV}{dt} = \frac{r M_V}{V \rho} \frac{dV}{dt} = r \frac{dV}{dt} = -(p_i - p_a)$$

$$\phi = - \frac{dV}{dt} = \frac{p_i - p_a}{r}.$$

Dagegen ergibt sich entsprechend den Versuchsbedingungen für konstantes Volumen ( $\frac{dV}{dt} = 0$ ) die Differentialgleichung

$$\tau \frac{dp_i}{dt} + p_i = p_a$$

mit der Lösung

$$p_i = p_a + p_0 e^{-t/\tau}.$$

Hierbei bedeutet  $\tau = \frac{mV}{RTp}$  die im Versuch ermittelte Druck-Abklingkonstante. Somit gilt:

$$\phi = \frac{mV}{\rho RT \tau} (p_i - p_a) \approx 2 \cdot 10^5 \frac{p_i - p_a}{\tau}$$

$p_i - p_a$  in  $\text{kp/cm}^2$ ;  $\tau$  in Stunden;  $\phi$  in  $\text{cm}^3/\text{s}$ .

Die nach dieser Beziehung aus den Abklingkonstanten  $\tau$  berechneten Mengenströme  $\phi$  sind mit in Tabelle 1 angegeben.

### B3.2: Versuchsdurchführung

Nachdem die Stahlbeton-Plattenstreifen der statischen Vorbelastung unterzogen worden waren, wurden aus dem mittleren Bereich 1 m lange Versuchskörper herausgesägt. Durch geeignete Lagerung wurde versucht, die Beanspruchung beim Sägen möglichst klein zu halten. Im Anschluß an eine kurze Reinigung von der zur Sichtbarmachung der Risse verwendeten Schlemmkreide sind die Versuchskörper auf dem Dichtigkeitsprüfstand in einer 5 cm breit umlaufenden Mörtel-Ausgleichsschicht verlegt worden. Bei Prüfkörpern mit klaffenden Rissen wurden diese vor der eigentlichen Abdichtung ebenfalls mit Zementmörtel ausgefüllt. Die Abdichtung des Versuchskörpers gegen den Prüfstand erfolgte im allgemeinen nach einem Bitumenkaltanstrich mit Heißbitumen B 85/25 über die volle Höhe der Seitenflächen. Als zusätzliche Dichtungsmaßnahme im Bereich von Flansch und Auflager wurden vor Durchführung der Gasdichtigkeitsprüfung jeweils 8 bis 12 l Wasser in den Prüfstand gefüllt; das entspricht einer Füllhöhe von 2,5 bis 3,5 cm.

Bei der Gasdichtigkeitsuntersuchung wurde der Abfall des Druckes  $p_y$  im Prüfbehälter über die Zeit  $t$  registriert. Mit dem verwendeten induktiven Druckaufnehmer kann die Druckdifferenz gegenüber dem atmosphärischen Druck im Bereich zwischen 0 und  $0,1 \text{ kp/cm}^2$ , entsprechend 0 bis 1000 WS, gemessen werden. Der elektrische Analogwert wird über einen Trägerfrequenzverstärker einem Pegelschreiber zugeführt und so die Druckabnahme im logarithmischen Maßstab aufgezeichnet. Der bei einem ungestörten Vorgang exponentielle Druckabfall wird auf diese Weise zu einer Geraden verzerrt; hierdurch lassen sich Störeinflüsse besonders leicht erkennen.

Als Hilfsgröße wurden mit handelsüblichen Thermographen bzw. Barographen Temperatur und Druck registriert.

Der Prüfüberdruck wurde von einer Druckluft-Stahlflasche möglichst langsam aufgebracht, so daß eine Temperaturabnahme durch die Entspannung der Druckluft nicht zu befürchten war. Die Prüfdauer richtete sich nach der Höhe des Prüfüberdruckes, nach der Änderung des Luftdruckes und nach der Durchlässigkeit des Prüfkörpers. Insofern konnten nicht in jedem Falle die Wünsche des Auftraggebers Berücksichtigung finden. Das Auflösungsvermögen der Registriereinrichtung lag bei  $0,4 \text{ dB}$ , das entspricht einer Druckänderung von  $4,8\%$  des eingestellten Überdruckes oder - bei  $500 \text{ mmWS}$  - von  $2,4\%$  des Absolutdruckes im Behälter.

Bei der Durchführung der Gasdichtigkeitsuntersuchungen ergaben sich eine Reihe von genauigkeitsmindernden Störeinflüssen, die nachfolgend kurz besprochen werden sollen:

1. Änderungen der Wetterlage äußern sich in einer Änderung des atmosphärischen Druckes. Jede Luftdruckänderung ändert den Prüfüberdruck im Behälter im gleichen Maße, z.B. bedeutet ein Luftdruckabfall von 1 mb einem Druckanstieg im Behälter um 10,2 mmWS gegenüber dem Außendruck: bei 25 mmWS Prüfdruck bedeutet das eine Verfälschung von etwa 40%. Da eine derartige Luftdruckschwankung noch als minimal anzusehen ist und innerhalb kurzer Zeit auftreten kann (etwa in einer Stunde), sind so geringe Prüfdrücke bei relativ dichten Versuchskörpern nicht anwendbar, vgl. Anlage 3. Das o.a. Auflösungsvermögen der Meßeinrichtung erlaubte bei 25 mmWS Überdruck eine Luftdruckschwankung von etwa 0,12 % zu erkennen. Derartige Druckschwankungen werden nicht nur durch Änderungen des atmosphärischen Druckes herbeigeführt, sondern auch das Öffnen und Schließen von Türen, die sich in einigen Metern Entfernung vom Prüfstand befanden, führt zu ähnlichen Störungen.

Sowohl eine rechnerische wie eine meßtechnische Korrektur des atmosphärischen Druckes waren nicht möglich. Eine rechnerische Korrektur ist aufwendig und schien in Anbetracht des fragwürdigen Zusammenhanges zwischen Gasdichtigkeit und maximaler Biegerotation nicht vertretbar zu sein. Für eine Korrektur bei der Messung fehlten die gerätetechnischen Voraussetzungen; hierzu sind zur Messung und Registrierung des absoluten Druckes und des Behälterüberdruckes Geräte gleichen Prinzips und gleicher Genauigkeit erforderlich. Daher wurden als Meßkurven nur Untersuchungsergebnisse verwendet, bei denen die Unsicherheit der Meßwerte für den Pegelabfall pro Zeiteinheit und damit für die Abklingkonstante kleiner als 10% ist.

2. Temperaturänderungen der Raumluft verursachen theoretisch im Prüfbehälter eine Druckänderung, die bei 1°C etwa 35 mmWS beträgt. Das würde selbst bei 500 mmWS Überdruck noch einen Fehler von 7% bedeuten. Hier wirkt sich jedoch die mehrschichtige Haubenkonstruktion als temperaturstabilisierend für die Luft im Prüfbehälter aus. Durch eine thermoelektrische Messung der Lufttemperatur wurde festgestellt, daß bei Raumtemperaturen zwischen 20 und 25°C die Behältertemperatur über mehrere Stunden bei  $23,4 \pm 0,03^\circ\text{C}$  lag. Temperatureinflüsse brauchten also nicht berücksichtigt werden.
3. Für die Genauigkeit der Ergebnisse spielt bei der elektrischen Messung von nur langsam veränderlichen Größen die Nullpunkt Konstanz des Meßsystems eine große Rolle. Daher wurde im Meßbereich zwischen 0 und 50 mmWS Überdruck die Nullpunkt Konstanz des Systems Druckaufnehmer-Meßbrücke-Pegelschreiber mehrfach über jeweils 2 Stunden ermittelt. Es ergab sich, daß die Abweichungen höchstens  $\pm 4$  mmWS entsprechen und die Meßunsicherheit somit für einen Überdruck von 500 bis 100 mmWS immer unter 4% bleibt.

### B3.3: Meßergebnisse

Als Meßbeispiel für die durchgeführten Untersuchungen ist diesem Bericht Anlage 3 beigelegt. Die Anlage enthält drei Diagramme: Rechts oben das Diagramm über den Temperaturverlauf während der Versuchsdauer, links oben ein Diagramm, das die Druckänderung - ausgehend von einem Überdruck von 500 mmWS - zeigt.



Tabelle 1: Ergebnisse der Gasdichtigkeitsprüfung

Versuchskörper	Bewehrung	Betonalter der z.Z. der Prüfung in Tagen	Druckabfall bei einem Überdruck von jeweils					Abklingkonstante	Mengenstrom
			500 mmWS		320 mmWS	200 mmWS	125 mmWS	bei 500 mmWS	bei 500 mmWS
			$\Delta L_p / \Delta t$ in dB/h	Prüfdauer in h	$\Delta L_p / \Delta t$ in dB/h	$\Delta L_p / \Delta t$ in dB/h	$\Delta L_p / \Delta t$ in dB/h	$\tau$ in h	$\phi$ in cm <sup>3</sup> /s
1.1	4φ16 I	79	1.0	2	1.0	0.9	-	8.68	0.32
1.2	4φ16 I	59	1143	63 s	-	-	-	0.00759	365
1.4	4φ16 I	86	0.10	15.5	0.13	0.025	0.1	84.27	0.033
3.2	6φ12 I	70	1.0	2.3	0.6	0.6	0.25	8.68	0.32
3.3	4φ12 I	107	1.6	1.5	-	-	-	5.42	0.518
3.4	4φ12 I	80	1.52	1.3	-	-	-	5.71	0.487
4.1	6φ16 IIb	106	0.57	6	0.59	-	-	15.23	0.182
5.1	4φ12 IIb	122	0.73	1.5	0.7	0.42	0.37	11.89	0.234
5.2	4φ12 IIb	232	0.37	4.0	-	-	-	23.46	0.118
6.1	4φ16 Iger.	148	0.48	2.3	0.23	0.2	0.23	18.08	0.154

darunter befindet sich ein ähnliches Diagramm für einen Überdruck von 125 mmWS. In den Druckdiagrammen ist der Luftdruck im linearen Maßstab mit eingetragen. Für den Behälterüberdruck wurde entsprechend den Meßbedingungen eine logarithmische Skala gewählt. Wie ersichtlich ist, erhält man bei höherem Überdruck einen recht guten linearen Verlauf, während man bei mäßigem Überdruck, etwa unterhalb von 100 mmWS wegen des bereits behandelten atmosphärischen Druckeinflusses keine gute Linearität erwarten kann.

Aus diesen und den entsprechenden Diagrammen für die anderen Versuchskörper wurde als Meßwert die Steigung der Geraden als Tangente an dem eingestellten Überdruck entnommen.

In Anlage 4 ist die ermittelte Druckabnahme für alle Versuchskörper graphisch dargestellt. Hierbei ist ausgehend von einem Überdruck  $p_{\bar{u}} = 500 \text{ mmWS}$  unabhängig von der tatsächlichen Meßdauer, die durch größere Strichbreiten hervorgehoben ist, jeweils bis zur nächsten Druckstufe extrapoliert und dann an diese Stufe der folgende Meßwert angesetzt worden. Wie ersichtlich ist, hängen alle Kurven leicht durch; es besteht also eine Druckabhängigkeit in der Art, daß bei höherem Druck ein steilerer Abfall vorhanden ist als bei niedrigerem Druck.

Die gemessene Abnahme des Druckpegels für Überdrücke über 100 mmWS ist in Tabelle 1 zusammengestellt. Außerdem enthält diese Tabelle die aus den Pegelminderungen errechneten Werte für die Abklingkonstanten und für den stationären Durchfluß.

Die Prüfung der Gasdichtigkeit bietet im Gegensatz zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit nur wenig Gelegenheit zu augenscheinlichen Feststellungen. Daher ist eine Beurteilung bei den meisten Versuchskörpern praktisch nur aufgrund der Meßergebnisse möglich. In einigen Fällen wurde das Prüfschema geändert bzw. erweitert. Nachfolgend wird über die Ergebnisse der zusätzlichen Untersuchungen und über spezielle Beobachtungen berichtet.

Die große Undichtigkeit der Versuchsplatte 1.2 erlaubte eine problemlose Bestimmung des Druckabfalles auch bei niedrigem Prüfdruck. Bei einem Anfangsüberdruck von 25 mmWS erfolgte die Druckabnahme auf 2,5 mmWS, das bedeutet eine Änderung um 20 dB, in 50 s. Dieses Ergebnis wurde mehrfach reproduziert.

Bei 500 mmWS Überdruck wurde eine Abklingzeit  $\tau = 27,3 \text{ s}$  ermittelt. Diesem Wert würde nach der in Abschnitt B3.1 angeführten Rechnung ein stationärer Durchfluß oder Mengenstrom von 0,36 l/s oder 1260 l/h entsprechen. Um zu prüfen, inwieweit dieser Wert zutreffend ist, bietet sich außer der direkten vergleichenden Messung eine Umrechnung der ermittelten stationären Wasserdurchlässigkeit dieses Prüfkörpers auf die stationäre Gasdurchlässigkeit an. Da der Strömungswiderstand  $r$  der Viskosität  $\eta$  direkt proportional und sonst nur noch eine Funktion der Spaltgeometrie ist, gilt:

$$\frac{\phi_{\text{Luft}}}{\phi_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{\eta_{\text{H}_2\text{O}}}{\eta_{\text{Luft}}} \bigg|_{T=20^\circ\text{C}} = \frac{1,01 \cdot 10^{-2}}{1,82 \cdot 10^{-4}} = 55,5.$$

Setzt man für die Wassermenge bei  $\Delta p = 0,05 \text{ kp/cm}^2$  den mittleren Meßwert  $\phi_{\text{H}_2\text{O}} = 1,5 \text{ l/h}$



ein (s. Anl. 10), erhält man  $\phi_{\text{Luft}} = 83 \text{ l/h}$ . Dieser Wert beträgt also nur den fünfzehnten Teil, der aus der Abklingkonstanten ermittelten Gasmenge. Die Ursache dieser Abweichungen liegt darin, daß sich während der etwa 24-stündigen drucklosen Wasserlagerung der Versuchskörper die Risse zum Teil bereits wieder zusetzen und damit die Dichtigkeit im Sinne einer Zunahme verändern. Deshalb ist auch grundsätzlich kein Zusammenhang zwischen Gas- und Wasserdichtigkeit zu erwarten, zumindest solange nicht, wie die Undichtigkeit nur durch relativ feine Risse bedingt ist.

Bei diesem Versuchskörper, für den als einzigen nach Durchführung der Prüfung ein mit dem Rotameter meßbarer Mengenstrom  $\phi > 1 \text{ cm}^3/\text{s}$  errechnet wurde, ist anfangs eine direkte Messung der Durchflußmenge versäumt worden. Diese Prüfung wurde deshalb nach Abschluß aller Untersuchungen nachgeholt, nachdem zwischenzeitlich mehrere Male die Wasserdurchlässigkeit untersucht worden war. Die Gasdichtigkeit war in dieser Zeit von ursprünglich 1143 dB/h auf 3 dB/h zurückgegangen! Die Übereinstimmung zwischen Abklingkonstante  $\tau$  und Durchflußmenge  $\phi$  war bei der gleichzeitig durchgeführten Messung beider Größen erheblich besser: Errechnet wurden  $\phi = 1 \text{ cm}^3/\text{s}$ , gemessen  $\phi = 1,8 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Der Zusammenhang zwischen  $\tau$  und  $\phi$  wurde auch durch eine vergleichende Messung mit einer Versuchsanordnung nach DIN 52 213 zur statischen Bestimmung des Strömungswiderstandes von Schallabsorptionsmaterialien bestätigt.

Am Versuchskörper 3.4 wurde die Dichtigkeit des Haubenflansches geprüft, indem nach einer Prüfung ohne Wasserfüllung noch eine Prüfung mit der normalerweise zur Erhöhung der Dichtwirkung verwendeten Auffüllung von 8 bis 10 l Wasser - Füllstand etwa 2 cm - durchgeführt wurde. Die Druckabnahme verminderte sich hierdurch von 1,58 dB/h auf 1,56 dB/h, das entspricht einer Verringerung des Durchflusses bzw. eines nicht durch den Versuchskörper bedingten Anteiles der Durchlässigkeit von 1,7 %.

Die erste Prüfung der Gasdichtigkeit von Versuchskörper 5.2 ergab für 500 mmWS Überdruck ein Abfall von 1 dB/h über 135 Stunden. Bei der anschließend durchgeführten Prüfung der Wasserdichtigkeit stellte sich jedoch heraus, daß am Haubenflansch eine Undichtigkeit bestand, so daß der Versuch abgebrochen werden mußte. Es war somit zu vermuten, daß das genannte Prüfergebnis für die Gasdichtigkeit durch die Undichtigkeit des Prüfstandes und nicht durch die Risse im Versuchskörper bedingt waren. Eine Wiederholungsmessung nach 4 Monaten ergab einen Wert für die Gasdichtigkeit von 0,37 dB/h. Hierbei wurde vorausgesetzt, daß nach dieser Zeit der Prüfkörper wieder hinreichend ausgetrocknet war. Nachträglich kann aber nicht mehr entschieden werden, ob diese Differenz zum ersten Ergebnis auf die ursprüngliche Undichtigkeit der Haube zurückzuführen ist, oder ob ein Teil dieser Differenz durch eine Abnahme der Undichtigkeit im Prüfkörper infolge der Wassereinwirkung (Nachhydratation) erklärt werden muß.

In diesem Zusammenhang wurde auch der Einfluß der Wasserlagerung auf die Gasdichtigkeit nochmals direkt überprüft. Eine unmittelbar an die Wasserdichtigkeitsprüfung durchgeführte nochmalige Prüfung der Gasdichtigkeit ergab bei Versuchskörper 5.2 nur noch eine Druckabnahme von 0,042 dB/h, also noch etwa 11,3% des Wertes vor der Wasserdurchlässigkeitsprüfung (0,37 dB/h)<sup>\*)</sup>. Wie auch die Ergebnisse an Versuchskörper 1.2 zeigen, kann man kleinere Risse vermutlich durch mehrfache temporäre Wasserlagerung - hinsichtlich der Luftdurchlässigkeit - sanieren.

<sup>\*)</sup> Bei Übergang zu linearen Größen ist der zahlenmäßige Unterschied noch größer: 0,37 dB/h bedeutet eine Druckänderung von 4,3%/h, dagegen 0,042 dB/h eine Änderung von etwa 0,5%/h.

Die Ergebnisse der Gasdichtigkeituntersuchungen können wie folgt zusammengefaßt werden:

1. Die Druckabnahme mit der Zeit zeigt eine mäßige Druckabhängigkeit. Als Ursache kommt in erster Linie - ähnlich wie bei der Druckabhängigkeit der Wasserdurchlässigkeit - die Aufweitung der Risse im Versuchskörper mit zunehmender Druckbeanspruchung in Frage. Bei Verwendung der Pegelminderung als Beurteilungsgrundlage liegt man bei einem Überdruck von 500 mmWS daher auf der sicheren Seite.
2. Der Druckabfall ist nicht nur durch Undichtigkeit der Prüfkörper bedingt, sondern es gibt ähnlich wie bei der Wasserdichtigkeit den Vorgang einer Speicherung. Bringt man einen definierten Überdruck auf einen Prüfkörper auf, läßt diesen Überdruck etwa 1 Stunde einwirken und entlüftet anschließend den Prüfstand einige Minuten, so erfolgt zunächst ein Druckausgleich. Schließt man jedoch das Einlaßventil zum Prüfstand wieder, so kann man nach kurzer Zeit eine Drucksteigerung im Prüfraum beobachten. Dieses Ergebnis bedeutet, daß ein Teil der Luft offenbar unter Druck und mit Überwindung des Strömungswiderstandes in Feinrisse eingedrungen ist und nach dem Druckausgleich wiederum in den nunmehr unter relativem Unterdruck stehenden Prüfbehälter zurücktransportiert wird. Es wird für möglich gehalten, daß die Versuchskörper - mit Ausnahme von Körper 1.2 - insgesamt gasdicht waren und die beobachtete Druckabnahme ausschließlich auf diesen Speicher- oder Eindringeffekt zurückgeführt werden kann.
3. Zwischen Gasdichtigkeit und Rotation im Bruchzustand konnte kein gesetzmäßiger Zusammenhang hergestellt werden, vgl. Anlage 17. Offensichtlich ist der Bereich der Rotationen für eine stationäre Gasdurchströmung noch zu gering. Ausgehend von der maximalen Biegerotation  $\theta$  etwa  $3 \cdot 10^{-2}$  rad ist bei noch größeren Rotationen allerdings mit wesentlichen Mengenströmen zu rechnen. Hierbei ist aber zu bedenken, daß dann die Traglast der Prüfkörper bereits überschritten ist und damit die Notwendigkeit gasdichter Bauteile entfällt.
4. Wie Anlage 16 zeigt, konnte auch kein Zusammenhang zwischen Gasdichtigkeit und Wasserdichtigkeit gefunden werden. Dieses Ergebnis ist in Anbetracht des Einflusses einer Wasserbeanspruchung auf die Gasdichtigkeit kaum überraschend und ist in Übereinstimmung mit anderen Untersuchungen [2/3/].
5. Falls diese Untersuchungen fortgeführt werden sollen, sind für die Gasdichtigkeitsprüfung eine Reihe von Änderungen in den Versuchsbedingungen, in der Versuchsdurchführung und in der Gestaltung der Versuchskörper vorzunehmen. Diese Änderungen beziehen sich auf eine Verminderung des Luftdruckeinflusses, auf die Erzeugung definierter Risse und auf die Notwendigkeit die Biegebeanspruchung während der Dichtigkeitsprüfung konstant zu halten, um den gewünschten Zusammenhang zwischen Rotation und Dichtigkeit herzustellen. Konstruktive Möglichkeiten für die Lösung dieser Wunschvorstellungen können bisher jedoch noch nicht für alle diese Probleme angegeben werden.

#### B4: Wasserdichtigkeit biegebeanspruchter Stahlbeton-Plattenstreifen

##### B4.1: Kennzeichnung der Wasserdichtigkeit

Zur Prüfung der Wasserdichtigkeit wurde die von den Versuchskörpern aufgenommene Wassermenge in Abhängigkeit von der Zeit ermittelt. Die Beschreibung der Dichtigkeit richtet sich nach dem Grad der Wasseraufnahme. Kommt es innerhalb der Beobachtungsdauer von 24 Stunden zu einer stationären Durchströmung des Versuchskörpers, wird man die Durchflußmenge (Mengenstrom) als Maß für die Undichtigkeit verwenden. Tritt jedoch innerhalb dieser Zeit das Wasser nur in nichtmeßbaren Mengen aus oder bleibt es bei einer örtlich begrenzten Durchfeuchtung, dann kann die Dichtigkeit gekennzeichnet werden:

1. durch die in einer bestimmten Zeit aufgenommene Wassermenge in Anlehnung an DIN 4032
2. durch die Wassereindringzahl
3. durch den Grad der sichtbaren Durchfeuchtung der Versuchskörper in Analogie zu DIN 1048.

In DIN 4032 wird als Kriterium die unter den dort genannten Prüfbedingungen aufgenommene Wassermenge pro  $\text{dm}^2$  Oberfläche verwendet, wobei die Dichtigkeit bis zu einer Menge von  $1,4 \text{ cm}^3/\text{dm}^2$  als gewährleistet angesehen wird. Ein ähnliches Bewertungsverfahren hat sich bei den hier durchgeführten Untersuchungen nicht als sinnvoll erwiesen. Die Ermittlung der Bezugs-Oberfläche bereitet bei einem gerissenen Prüfkörper Schwierigkeiten, da die Rißfläche ( $= 2 \cdot \text{Riß-anzahl} \cdot \text{Rißlänge} \cdot \text{Rißtiefe}$ ) ein mehrfaches der geometrischen Oberfläche betragen kann. Außerdem sind je nach Rißweite völlig unterschiedliche Wassereindringmechanismen wirksam: Bei Prüfkörpern mit klaffenden Rissen (Bewehrung mit Stahl I) wird das Wasser ohne Widerstand bis weit in den Querschnitt hineingedrückt und erst mit abnehmender Rißbreite bewirken Kapillareffekte die Wasseraufnahme. Dagegen wird bei Versuchskörpern mit Haarrissen ( $\text{Rißbreite} < 200 \text{ }\mu\text{m}$ ) das Wasser von Anfang an durch den Kapillarsog - durch den anstehenden Wasserdruck verstärkt - aufgenommen. Im ersten Fall ist die Füllmenge des Behälters um das Rißvolumen größer als im zweiten Fall; jedoch ist die kurz nach Beobachtungsbeginn aufgenommene Wassermenge bei Vorhandensein von Haarrissen größer als bei klaffenden Rissen, vgl. z.B. die Anfangswerte von Abb. 5 mit denen in Abb. 6. Eine Beurteilung aufgrund der Menge nach nur halbstündiger Druckbeanspruchung gemäß DIN 4032 ist hier also nicht möglich. Daher wurde als ein Beurteilungsmaßstab die tatsächliche, innerhalb von 8 Stunden und von 12 Stunden aufgenommene Wassermenge verwendet.

Es sind verschiedene Ansätze gemacht worden, um die Wasseraufnahme (häufig Wasserdurchlässigkeit genannt) theoretisch zu behandeln, wobei man beispielsweise den Vorgang analog zur stationären Wärmeleitung zu beschreiben versucht:

$$v = \frac{V}{Ft} = \frac{k}{d} (p_i - p_a) \quad .$$

Der Wasserstrom  $\phi$ , d.h., die von einem Versuchskörper der Dicke  $d$  pro Flächen- und Zeiteinheit aufgenommene Wassermenge  $V$  sollte somit dem Wasserdruck  $p_i - p_a$  proportional sein. Die Größe  $k$ , die z.B. von Walz /2/ Durchlässigkeitsziffer genannt, besser aber mit Wasserleitzahl oder Strömungsleitwert bezeichnet werden sollte, kann etwa  $10^{-9}$  bis  $10^{-13} \text{ cm/s}$  betragen. Die Anwendung dieses Ansatzes

verliert seine Berechtigung, wenn keine stationäre Durchströmung vorhanden ist und somit weniger eine lineare Zeit- noch eine lineare Druckabhängigkeit besteht, wie im Falle der kapillaren Wasseraufnahme.

Solange der Wasserdruck einseitig an einer porösen Platte hinreichender Dicke mit geschlossenem Gefüge ansteht, wird die Feuchtigkeit vorwiegend durch Kapillarkräfte aufgenommen. Nach Cammerer /4/ beschreibt man die Feuchtigkeitsleitung in Kapillaren durch die Beziehung

$$e_W = \psi \rho \sqrt{\frac{2H}{R}} \sqrt{t},$$

die bei vertikaler Ausbreitung gilt bis die Steighöhe  $H$  in der Kapillare erreicht wird. Erläuterung:

$e_W$	aufgesaugte Wassermenge in $l/m^2$
$\psi$	Feuchtigkeitsgehalt in $m^3/m^3$
$\rho$	Dichte des trockenen Materials
$R$	kapillarer Reibungskoeffizient
$t$	Zeit

Die Größe  $A = \psi \cdot \rho \cdot \sqrt{\frac{2H}{R}}$  wird als Wassereindringzahl bezeichnet. In einer Kapillare ist die maximale Steighöhe entgegen der Schwerkraft durch den Gleichgewichtszustand zwischen Kapillarzug  $p_s = \frac{2\sigma}{R}$  und Gewicht der Wassersäule  $\rho_W \cdot H$ ,  $\sigma$  = Oberflächenspannung des Wassers,  $r$  = Kapillarradius, gegeben. Bei bekanntem Reibungskoeffizienten wäre es somit möglich, die Eindringzahl  $A$  rechnerisch zu bestimmen. Poröse Baustoffe sind jedoch nicht mit zylindrischen Kapillaren einheitlichen Durchmessers vergleichbar, da sie Hohlräume unterschiedliche Größe aufweisen, die teilweise nicht zusammenhängend sind (Sackporen), so daß die Eindringzahl aus Versuchen ermittelt werden muß.

Infolge des linearen Zusammenhanges zwischen Wassermenge und Quadratwurzel aus der Zeit kann die Wassereindringzahl allerdings einfach und recht genau bestimmt werden, wobei die Linearität als eine Bestätigung des vorausgesetzten kapillaren Saugvorganges gewertet werden kann.

Bei dieser wie auch bei anderen Untersuchungen hat sich gezeigt, daß eine Beschreibung der Wasserdurchlässigkeit in Analogie zu DIN 1048 etwa ab einer sichtbaren Durchfeuchtung unter Umständen mehr Aussagewert besitzt, als aufgenommene Wassermenge und Eindringzahl. Die unter Umständen großen Wertbereiche dieser Kennziffern täuschen qualitative Unterschiede vor, die in Wirklichkeit gar nicht vorhanden sind. Bei einer Kennzeichnung der Dichtigkeit anhand der augenscheinlichen Wasserdurchlässigkeit empfiehlt es sich, nach folgenden Merkmalen abzustufen:

**Wasserdurchlässigkeits-  
Stufe**

**Merkmal**

1	keine sichtbare Durchfeuchtung
2	Bildung stumpf aussehender feuchter Stellen, die etwa innerhalb von 6 Stunden durch Verdunstung abtrocknen
3	Bildung glänzend feuchter Stellen
4	Tropfenbildung
5	Tropfenabfall
6	Wasseraustritt in größeren Mengen

Mit Stufe 6 wird der stationäre Wasserdurchlaß beschrieben, wenn er mindestens in Form eines Rinnfalls erfolgt. Die Lokalisation der Wasseraustrittsstelle ist erfahrungsgemäß nur in seltenen Fällen möglich. Das Abtropfen erfolgt nicht zwangsläufig an einer undichten Stelle (etwa unter einem Riß in der Zugzone), sondern mit größerer Wahrscheinlichkeit innerhalb des Durchfeuchtungsbereiches an der tiefsten Stelle der Prüfkörper-Oberfläche.

Die von den Versuchskörpern aufgenommene Wassermenge bzw. die Durchflußmenge, die Wassereindringzahl für den Anfangs- und Endbereich der Mengenkurven und die Wasserdurchlässigkeits-Stufen nach Augenschein sind in Tabelle 2 als Ergebnisse der Wasserdichtigkeitsprüfung zusammengestellt.

#### B4.2: Versuchsdurchführung und Beobachtungen

Nach Abschluß der Gasdichtigkeitsprüfung brauchte nur das Luftventil des Prüfstandes geschlossen und das Wassereinlaßventil geöffnet zu werden, um mit der Wasserdichtigkeitsprüfung beginnen zu können. Die Untersuchungen wurden - nach 24-stündiger druckloser Wasserlagerung der Versuchskörper - mit einer Drucksteigerung gemäß DIN 4032 eingeleitet. Zwischen den Druckstufen 1 mWS und 3 mWS bzw. 3 mWS und 5 mWS mußte die Druckbeanspruchung jeweils für etwa 5 Minuten unterbrochen und der Wasserbehälter auf das nächsthöhere Niveau transportiert werden. Die Wassermenge wurde anfangs häufiger, später in Abständen, die der Wasseraufnahme angepaßt waren, über 24 Stunden registriert; während der Nachtstunden erfolgten jedoch keine Messungen.

Im Laufe der Versuchsdurchführung wurden an den Versuchskörpern folgende Feststellungen im Hinblick auf die Wasserdichtigkeit getroffen:

##### Versuchskörper 1.1:

Bereits kurz nach Einstellen des Druckes von 3 mWS zeigten sich an der Unterseite des Versuchskörpers an drei Stellen erste Tropfen, die etwa 15 Minuten nachdem der Druck auf 5 mWS erhöht worden war, innerhalb von 30 bis 180 s vom Prüfkörper abtropften. Nach einer Stunde hörte die Tropfenbildung allmählich auf und im Bereich des klaffenden Risses markierte sich an der Unterseite eine ausgedehnte Durchfeuchtungszone. An der Stelle eines im Versuchskörper für das Rollengerät zur Registrierung der Durchbiegung eingesetzten Dübels wurde ebenfalls Durchfeuchtung beobachtet.

##### Versuchskörper 1.2:

Der Prüfkörper erwies sich schon bei drucklosem Wässern als undicht, wobei sich zunächst ein durchgehender und zwei kleinere Risse als durchfeuchtete Streifen markierten. Bei 1 mWS Druck ergab sich bereits ein stationärer Durchfluß von



3,6 l/h, bei 3 mWS ein Durchfluß von 9 l/h und bei 5 mWS ein stationärer Durchfluß von 23,5 l/h, vgl. Anl. 10. Die Prüfung wurde deshalb nach kurzer Zeit abgebrochen; die in Tabelle 2 angegebenen Werte für 8 und 24 Stunden sind extrapoliert. Anschließend wurde noch die Durchlässigkeit unter 200 mmWS Druck über 56 Stunden ermittelt und hierbei ein Durchfluß von 0,42 l/h bestimmt.

#### Versuchskörper 1.3:

Dieser Versuchskörper konnte im statischen Versuch bei der höchsten Laststufe nicht mehr rechtzeitig abgefangen werden und brach; er stand deshalb für die Gas- und Wasserdichtigkeitsuntersuchungen nicht zur Verfügung.

#### Versuchskörper 1.4:

Von den vier Prüfkörpern dieser Serie wurde dieser vergleichsweise am schwächsten belastet, um zu zeigen, daß dann im Gegensatz zu den Prüfkörpern 1.1 und 1.2 keine Wasserdurchlässigkeit auftritt. Das Versuchsergebnis bestätigte diese Erwartung.

#### Versuchskörper 3.1:

Dieser Versuchskörper fiel für die Gas- und Wasserdichtigkeitsprüfungen aus, da er sich nach der statischen Prüfung beim Transport vom Kranhaken löste und beim Absturz zerstört wurde.

#### Versuchskörper 3.2:

Der Prüfkörper wies auf der Zugseite nahe dem Rand des Belastungsbereiches einen klaffenden Riß von durchschnittlich 1,5 mm Breite auf, unter dem sich bereits nach 15 Stunden druckloser Wasserlagerung eine Durchfeuchtung zeigte, die mit zunehmendem Druck schnell bis zum Abtropfen - 3 Stunden nach Druckerhöhung auf 5 mWS - zunahm. In 24 Stunden traten 590 cm<sup>3</sup> Wasser durch den Prüfkörper, wobei der Mengenstrom stationär etwa 25 cm<sup>3</sup>/h betrug.

#### Versuchskörper 3.3:

Der Versuchskörper erwies sich infolge der niedrigen statischen Belastung als dicht. Die aufgenommene Wassermenge ist die kleinste von allen Versuchskörpern.

#### Versuchskörper 3.4:

Bei diesem Versuchskörper wurde das Prüfschema variiert, um den Einfluß des Wasserdrucks studieren zu können. Alle drei Prüfdrücke - 1, 3 und 5 mWS - wurden etwa 23 Stunden aufrechterhalten. Die während der gesamten Prüfdauer aufgenommene Wassermenge ist in Anlage 9 dargestellt.

#### Versuchskörper 4.1:

Der Versuchskörper mit maximalem Bewehrungsgehalt, der fünf etwa 0,4 mm breite Risse im Abstand von  $19 \pm 2$  cm aufwies, war bis auf eine Durchfeuchtung entlang der Längsränder wasserdicht. Nach 6 Stunden erstreckte sich diese sichtbare Durchfeuchtung auf der Unterseite des Prüfkörpers auf etwa 15%, nach 12 Stunden auf etwa 30% und nach 30 Stunden auf etwa 70% der Grundfläche, wobei sich zuletzt auch Tropfen bildeten. Es wird vermutet, daß diese Durchfeuchtung von der Berandung ausgehend auf eine Umläufigkeit der Bitumenabdichtung zurückzuführen ist. Allerdings kann so nicht erklärt werden, weshalb an den Schmalseiten keine Feuchtigkeit ausgetreten ist.

#### Versuchskörper 5.1:

Bei den Prüfungen nach DIN 4032 war der Prüfkörper dicht. Dagegen wurden nach 3 Stunden Druckbeanspruchung mit 5 mWS Durchfeuchtungen festgestellt, die von zwei im Foto auf Anlage 2 näher bezeichneten lokalen Stellen ausgingen; der Abstand der beiden Stellen entsprach dem Rißabstand von  $22 \pm 1$  cm. Außerdem



Tabelle 2: Ergebnisse der Wasserdichtheitsprüfung

Versuchskörper	Bewehrung	Betonalter z.Z. der Prüfung in Tagen	drucklos. aufgenommene Wassermenge		aufgenommene Wassermenge in l nach DIN 4032			aufgenommene Wassermenge in l		Wassereindringzahl in $l/\sqrt{h}$		Wasserdurchlässigkeitstufe	Bemerkungen
			Zeit in h	Menge in l	1 mWS	3 mWS	5 mWS	nach 8 h	nach 24 h	Anfangsbereich	Endbereich		
1.1	4φ16I	80	16.5	1.59	0	0.16	?	2.6	5.4	-	1.15	5	1
1.2	4φ16I	59	-	-	0.3	1.5	5.9	187	562	-	-	6	2
1.4	4φ16I	90	-	-	0	0.04	?	2.2	4.3	-	1.43	1	3
3.2	6φ12I	72	-	-	X	X	X	4.8	6.8	2.65	1.13	5/6	4
3.3	4φ12I	110	-	-	0	0	0	2.8	3.6	2.10	0.58	1	
3.4	4φ12I	83	-	-	s. Anlage 9			3.9	5.3	2.10	0.65	1	
4.1	6φ16IIb	110	37	2.0	0	0.18	?	3.6	4.6	1.75	0.53	(3)/4	
5.1	4φ12IIb	123	11	2.04	0	0.1	?	3.9	5.3	2.15	0.65	3	
5.2	4φ12IIb	100/233	65	3.0	0	0.13	0.27	4.2	5.9	2.30	0.80	3	
6.1	4φ16Iger.	153	16.5	1.04	1.5		0.24	3.9	5.2	2.25	0.95	1	
0	-	300	-	-	0	0	0	3.3	4.1	1.85	0.45	1	5
A	-	380	-	-							0.26	1/5	5

- Bemerkungen:**
- 1 Die Wasseraufnahme bei 5 mWS wurde nach 15 Min. noch nicht registriert; daher Kennzeichnung durch "?".
  - 2 Die aufgenommenen Wassermengen wurden im Gegensatz zu den entsprechenden Angaben bei den anderen Versuchskörpern hier infolge stationärer Durchströmung auch wieder abgegeben.
  - 3 Die ursprünglich vorgesehenen Versuchskörper der Serie 2, sind durch Änderung des Programmes entfallen; dafür wurden 1.3 und 1.4 neu aufgenommen.
  - 4 Eine Wasseraufnahme nach DIN 4032 wäre mit Sicherheit feststellbar gewesen; jedoch wurde die Registrierung versehentlich unterlassen.
  - 5 Die Vergleichsplatten 0 und A waren lediglich mit einer Transportbewehrung versehen, was jedoch für die Ergebnisse bedeutungslos ist, da diese Versuchskörper nicht statisch vorbelastet wurden.

durchfeuchtete auch dieser Versuchskörper entlang der Längsseiten vom Rande her im zunehmendem Maße, obgleich die Seiten des Versuchskörpers in voller Höhe mit Heißbitumen abgedichtet waren.

#### Versuchskörper 5.2:

Der Vergleichskörper zu 5.1 wurde bis zum Versagen der Tragfähigkeit statisch vorbelastet. Trotzdem zeigte sich bei 5 mWS nach 2 Stunden ebenfalls nur eine Durchfeuchtung bis Stufe 3 an einer Stelle der Versuchskörper-Unterseite, die jedoch nach einigen Stunden wieder abtrocknete. Dieser Versuch wurde nach 4 Monaten wiederholt, wobei die örtliche Durchfeuchtung reproduziert werden konnte.

#### Versuchskörper 6.1:

Dieser Versuchskörper mit geripptem Stahl I wurde nur schwach vorbelastet. Daher konnte innerhalb der Beobachtungsdauer erwartungsgemäß Wasserdichtigkeit festgestellt werden.

#### B4.3: Meßergebnisse

Die ermittelte Wasseraufnahme ist in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  in den Anlagen 5 bis 9 und als Funktion von  $\sqrt{t}$  in den Anlagen 11 bis 15 dargestellt. Die Meßwerte für die stationäre Durchströmung von Versuchskörper 1.2 sind in Anlage 10 wiedergegeben. Als Meßergebnisse für die geprüften Versuchskörper wurden in Tabelle 2 die Gesamt-Wassermengen nach 8 und nach 24 Stunden, die Wassereindringzahlen - bei geknickten Kurven für beide Bereiche - und die oben definierten Wasserdurchlässigkeitsstufen zusammengestellt. Die Wassereindringzahlen  $A = \frac{dV}{d\sqrt{t}}$  sind aus den Diagrammen, Anlage 11 bis 15, entnommen worden; ein Bezug auf die geometrische Oberfläche der Prüfkörper  $F = 0,67 \text{ m}^2$  ist nicht erfolgt.

Bei der statischen Vorbelastung von Versuchskörper 1.2 wurde die größte, auch nach Entlastung noch vorhandene Querschnittsrotation von  $\theta = 3,07 \cdot 10^{-2}$  rad innerhalb der gesamten Versuchsserie erreicht. Die Ursache der hier beobachteten Wasserdurchlässigkeit war zweifellos der beginnende Ausbruch des Betons im Bereich der Biegedruckzone. Unter dem Mikroskop wurden später Aussprengungen im Bereich der Feinzuschläge und etwa 6 bis 10 cm lange Risse mit einer Breite bis zu 15  $\mu\text{m}$  im Zementstein festgestellt. Noch lange Zeit nach der Prüfung konnte beim Eingießen von Wasser in den auf der Biegezugseite 5 mm breit klaffenden Riß nach maximal 60 s die Durchfeuchtung der Druckseite beobachtet werden. Neun Monate später war dieser Riß jedoch so weit wieder gedichtet, daß eine Durchfeuchtung gleichen Ausmaßes erst nach 4 Stunden auftrat. Diese Tatsache verdient besonders hervorgehoben zu werden, da hier offensichtlich der gesuchte Grenzfall der Biegebeanspruchung bzw. Rotation der Querschnitte erreicht wurde.

Wie aus Anlage 10 ersichtlich ist, besteht für den Versuchskörper 1.2 - bis auf den Wert bei 1 mWS - ein nahezu quadratischer Zusammenhang zwischen Menge, Strom und Druck. Nimmt man an, daß auch für die Durchströmung gerissener Betonkörper mit Wasser das Hagen-Poiseuillesche Gesetz für die Durchflußmenge pro Zeiteinheit gilt:

$$\Phi = \frac{1}{12\eta} \frac{b}{l} z^3 \Delta p$$

$b$  Rißbreite  
 $l$  Rißtiefe (Kapillarlänge)  
 $z$  Rißbreite

$\eta$  Viskosität  
 $\Delta p$  Überdruck

wäre eine lineare Abhängigkeit zwischen Mengenstrom und Druck sowie eine Zunahme der Wassermenge mit der dritten Potenz der Rißweite zu erwarten. Dieser scheinbare Widerspruch zwischen Theorie und Meßergebnis ist mit großer Wahrscheinlichkeit durch die Druckabhängigkeit der Rißbreite zu erklären. Bei der im Durchlässigkeitsprüfstand üblichen Lagerungsart war die Druckseite des statischen Vorversuches stets Zugseite. Die nachgewiesenen Risse auf der ehemaligen Druckseite öffneten sich also mit zunehmendem Wasserdruck, wobei es im Bereich der Spannungsnulllinie bzw. eines Gelenkes zu einer Zwängung mit abdichtender Wirkung kommt. Daher ist die sich unter dem Druck einstellende, für die Durchlässigkeit wirksame Rißbreite vermutlich nicht dem Druck direkt proportional, sondern es gilt entsprechend dem Versuchsergebnis  $bz^3 = F \cdot z^2 \sim p$ . Eine Berechnung der effektiven Rißbreite, wird für unmöglich gehalten.

Mit Ausnahme dieses einen Versuchskörpers 1.2 waren alle anderen in dem Sinne wasserundurchlässig, daß keine Durchströmung auftrat. Eine Beurteilung der anderen Prüfkörper, bei denen nur eine mehr oder weniger große Durchfeuchtung beobachtet wurde, ist außerordentlich schwierig, insbesondere, wenn die Bewertung nur anhand der aufgenommenen Menge und der Eindringzahl erfolgen soll. Beispielsweise kann man aus Tabelle 2 entnehmen, daß die Versuchskörper  $a = 1.1$ ,  $b = 1.4$ ,  $c = 5.1$  hinsichtlich der augenscheinlichen Wasserdichtigkeit (Wasserdurchlässigkeits-Stufe) und nach der Wasseraufnahme in 24 Stunden in der Reihenfolge  $b, c, a$ , dagegen in Bezug auf die Eindringzahlen nach 24 Stunden gemäß  $c, a, b$  und hinsichtlich der Wasseraufnahme in 8 Stunden in der Reihenfolge  $b, a, c$  zu staffeln sind. Lediglich bei Versuchskörper 3.2 deutet sich - unter Berücksichtigung der gegenüber den Prüfkörpern der Gruppe 1 veränderten Bewehrung und Betongüte - auch aufgrund der Meßwerte ein Übergang von einer gesteigerten Wasseraufnahme zur Wasserdurchlässigkeit an. Allerdings sind bei einer Wasseraufnahme in 8 Stunden zwischen 2,2 l und 4,8 l keine wesentlichen Unterschiede in der Dichtigkeit zu erwarten, wenn ein einzelner Haarriß in der Biegedruckzone bereits eine Aufnahme (= Durchlässigkeit) von 187 l bewirkt.

Bei Versuchskörpern, die sich als so dicht erweisen, daß keine stationäre Durchströmung eintritt, erfolgt die Wasseraufnahme durch Kapillarkräfte, wie anhand von Anlage 9 gezeigt werden kann. Bei einer Drucksteigerung erhöht sich die von Versuchskörper 3.4 aufgenommene Wassermenge sprunghaft, jedoch ist die Menge pro Zeiteinheit bzw. die Wassereindringzahl, die sich im Gleichgewichtszustand einstellt, etwa konstant, wie durch die parallelen Tangenten veranschaulicht werden soll. Ein solches druckunabhängiges Verhalten ist nur zu erwarten, wenn die Wasseraufnahme eines wasserundurchlässigen Prüfkörpers durch Kapillarkräfte erfolgt. Die Einstelldauer des Gleichgewichtszustandes ist dagegen druckabhängig; sie beträgt

bei 1 mWS etwa 12 Stunden; aufgenommene Menge etwa 1,5 l,

bei 3 mWS etwa 10 - 11 Stunden; aufgenommene Menge 3,5 l,

bei 5 mWS etwa 9 - 10 Stunden; aufgenommene Menge 4,5 l.

Aufgrund dieser Zusammenhänge war es auch möglich, die Wasseraufnahme von Prüfkörper 3.4 auf die üblichen Prüfbedingungen umzurechnen. Hierbei ergibt sich der in Anlage 6 mitangegebene Mengen-Zeitverlauf der gut zu den anderen Kurven paßt. Trotz der verlängerten Prüfdauer und damit verschärften Prüfbedingungen konnte keine Undichtigkeit dieses Versuchskörpers festgestellt werden.

Eine Gegenüberstellung der Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Zeit  $t$ , Anlage 5 bis 9, mit der Darstellung als Funktion von  $\sqrt{t}$ , Anlage 11 bis 15 zeigt, wieviel klarer diese "Saugkurven" eine quantitative Aussage erlauben als die "Mengenkurven". Besonders auffällig ist, daß

1. die Meßpunkte mit nur geringer Streuung auf Geraden liegen,
2. einige Meßkurven im untersuchten Bereich aus zwei Geraden-Abschnitten unterschiedlicher Steigung bestehen, also zwei Eindringzahlen  $A_1$  und  $A_2$  zu unterscheiden sind.

Ursache der beiden Steigungen ist das unterschiedliche Saugverhalten der Risse und des Betongefüges im Rißbereich. Nach Künzel und Schwarz müßte die Steigung der zweiten Geraden als reduzierte Wassereindringzahl bezeichnet werden, da im zweiten Abschnitt nur noch so viel Wasser aufgesaugt werden kann, wie vom ersten Bereich abgegeben wird. Das Verhalten der Prüfkörper entspricht der kapillaren Wasseraufnahme von Putz auf Gips oder zwei Vollziegeln mit zwischenliegender Kalkmörtelfuge /4/.

Zur Bestätigung dieser Behauptung sind auf Anlage 15 die Saugkurven der zusätzlich hergestellten und statisch nicht vorbelasteten Versuchskörper O und A angegeben. Versuchskörper O, der 10 vorgegebene Risse von 0,5 mm Breite und 20 cm Tiefe besitzt, zeigt ein ähnliches Saugverhalten, wie Versuchskörper 4.1; dort tritt lediglich die Sättigung im Rißbereich 3 Stunden später ein. Bei Versuchskörper A handelt es sich um eine 11 cm dicke, ebene Platte mit unbeschädigter Oberfläche, die jedoch von der Zementhaut befreit wurde, da Versuche von Walz/2/ ergaben, daß hierdurch die Wasseraufnahme auf ein Drittel reduziert werden kann. Wie die Wassereindringkurve, siehe Anlage 15, bestätigt, liegt bei der ungerissenen Platte nur ein einziger Wassereindringmechanismus vor.

Die Anfangs-Eindringzahlen  $A_1$  beginnen nicht zum Zeit-Nullpunkt. Damit entspricht die aufgesaugte Wassermenge einer Funktion

$$g_W = A_1 \sqrt{t} - g_0 \quad \text{oder aber} \quad g_W = A_1 (\sqrt{t} - \sqrt{t_0}) .$$

Diese scheinbar fehlende Wassermenge  $g_0$ , dürfte diejenige Menge sein, die im ersten Versuchsabschnitt, d.h. bei der Prüfung nach DIN 4032 unter 1 mWS und 3 mWS bereits aufgenommen wurde. Die Zeitverschiebung entspricht im Mittel etwa  $t_0 = 0,5$  Stunden.

Am Versuchskörper 4.1 wurde derjenige Feuchtigkeitsgehalt des Betons ermittelt, bei dem eine Durchfeuchtung sichtbar wird. Hierzu wurden Proben aus dem anscheinend trocken Mittelbereich und aus dem stark durchfeuchteten Randbereich entnommen, sowie der Feuchtigkeitsgehalt einer Probe nach 100 Stunden langer Wasserlagerung bestimmt. Dabei wurden folgende Werte ermittelt:

Nicht sichtbar durchfeuchtet:	3,9 Gew.-%
Sichtbar durchfeuchtet	: 5,5 Gew.-%
Gesättigt	: 7,0 Gew.-%

Die Grenze, ab der eine Durchfeuchtung sichtbar wird und damit auch eine wesentliche Verdunstung von der Oberfläche des Versuchskörpers ausgehen kann, wird vermutlich bei 5 Gew.-% liegen. Diese Werte werden gestützt durch Messungen der Wasserdurchlässigkeit nach DIN 1048, bei denen zusätzlich die aufgenommene Wassermenge ermittelt wurde. Völlige Durchfeuchtung des Betons der Versuchskörper 1.1 und 1.2 wurde im gesättigten Zustand bei 6,6 Gew.-% erreicht. Bei unvollständiger Durchfeuchtung konnte aus der Menge aufgenommenen Wassers  $V_g$  und der Höhe des Prüfkörpers  $h_0$  die

mittlere Eindringtiefe  $h = h_{ov} \frac{V_g}{g_{max}}$  in guter Übereinstimmung mit der sicht-

baren Durchfeuchtungszone ermittelt werden. Ein derartiger Wert für  $h$  scheint ein sicherer Mittelwert zu sein, als er nach DIN 1048 aus den in nur einer Ebene gespaltenen Prüfkörper hergeleitet werden kann. Das Normverfahren besitzt demgegenüber jedoch den Vorteil, daß die örtlichen Abweichungen von der mittleren Eindringtiefe direkt sichtbar sind.

Die Ergebnisse der Wasserdichtheitsprüfungen können wie folgt zusammengefaßt werden:

1. Zwischen Wasserdichtheit und Biegerotation konnte im untersuchten Bereich kein gesetzmäßiger Zusammenhang gefunden werden, vgl. Anl.17. Solange für die Rotation Werte  $\theta \approx 3 \cdot 10^{-2}$  rad auftreten, ist ein Wassereindringvorgang mit mehr oder weniger begrenzter Durchfeuchtung zu erwarten. Erst wenn die Biegerotation Werte  $\theta > 3 \cdot 10^{-2}$  rad annimmt, ist mit Rissen in der Biegedruckzone und demzufolge mit einer stationären Durchströmung von Stahlbetonbauteilen zu rechnen.
2. Für die stationäre Durchströmung des einzigen Versuchskörpers mit durchgehenden Rissen wurde eine quadratische Abhängigkeit der Durchflußmenge von dem Druck festgestellt, was dadurch zu erklären ist, daß die Durchflußmenge expliziert dem Druck und der effektiven Rißweite - und diese ebenfalls dem Druck - proportional ist.
3. Bei intakter Biegedruckzone findet in den Versuchskörpern ein kapillarer Feuchtigkeitstransport bis zur Sättigung oder zur völligen Durchfeuchtung der Versuchskörper statt. Bei den mit Stahl I bewehrten Versuchskörpern der Serien 1 und 3 ist ein wesentlicher Unterschied für die Wassereindringzahlen feststellbar. Vermutlich nehmen die mit dem höchsten Wasserzementwert und damit höchster Porosität, sowie geringster Würfeldruckfestigkeit des Betons hergestellten Körper der Serie 3 sogleich beim Eindringen des Wassers in die Risse auch erhebliche Mengen Wasser im Gefüge auf.

Die Differenz  $A_1 - A_2$  mit der das Saugvermögen der Risse allein charakterisiert werden kann, ist etwa konstant  $\Delta A = 1,40$ . Eine weitergehende Deutung oder die Herleitung eines Zusammenhanges der Wassereindringzahlen mit Rißfläche, Porosität, Wasserzementwert, Dicke der Biegedruckzone oder Festigkeit ist aufgrund der wenigen Meßwerte nicht möglich. Für den Schutzraumbau dürfte die Wassereindringzahl  $A_1$  die größere Bedeutung besitzen, da  $A_2$  gewissermaßen als materialspezifische Größe anzusehen ist. Das Vordringen des Wassers in die Risse ist nach 3,5 - 8 Stunden abgeschlossen; die aufgenommene Wassermenge liegt zu dieser Zeit bei 1,8 - 2,8 l/m<sup>2</sup> Oberfläche.



4. Es erhebt sich die Frage nach der Fortsetzung der Saugkurven, wenn die Druckwasser-Beanspruchung länger als 24 Stunden anhält. Vermutlich bildet sich nach Erreichen der maximalen Eindringtiefe infolge von Diffusion ein dritter Bereich aus, der durch sehr geringe Wasseraufnahme pro Zeiteinheit gekennzeichnet ist. Dieser theoretisch zu erwartende Gleichgewichtszustand wurde in keinem Falle beobachtet. Da durch Diffusion oder - bei völliger Durchfeuchtung - infolge von Verdunstung erhebliche Mengen unter Umständen radioaktiven Wasserdampfes in die Schutzräume gelangen können, dürfte es sich lohnen, diese Frage wesentlich genauer zu untersuchen, als es im Zusammenhang mit diesem Forschungsauftrag möglich war.

#### 4. Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

Aus Stahlbeton-Plattenstreifen mit den Abmessungen  $l/b/d = 332/64/32$  cm, Bewehrung  $0,24\%$  (Stahl I)  $< \mu < 0,64\%$  (Stahl IIIb) und Betondruckfestigkeiten zwischen  $184 \text{ kp/cm}^2$  und  $361 \text{ kp/cm}^2$  wurde nach einer statischen Vorbelastung, die zu einer maximalen Querschnittsrotation von etwa  $0,03 \text{ rad} \approx 1,7^\circ$  bzw. zu einer minimalen Dicke der Biegedruckzone von etwa 2 cm führte, ein 1 m langes Versuchsstück entnommen und einer Gas- und Wasserdichtheitsprüfung unterworfen. Der anfängliche Überdruck und die Versuchsdauer betrugen bei der Prüfung der Gasdichtheit  $500 \text{ mmWS} = 49,03 \text{ mb}$  bzw. etwa 8 Stunden, während die Wasserdichtheit bei  $5 \text{ mWS} = 490,3 \text{ mb}$  über 24 Stunden untersucht wurde. Dichtheit wurde dann als gegeben angenommen, wenn trotz weit aufgerissener Zugzone keine stationäre Durchströmung der Versuchskörper eintrat. Es wurden insgesamt 10 Versuchskörper auf Dichtheit geprüft, von denen sich nur ein einziger, mit Stahl I bewehrter Versuchskörper als durchlässig erwies.

Die Untersuchungen ergaben, daß die statische Vorbeanspruchung nicht zu einer Verletzung der Biegedruckzone führen darf, wenn die Gas- und Wasserdichtheit gewährleistet sein soll. Wird die Druckzone auch nur durch einen einzigen Haarriß verletzt, was bei einer Dicke von 2 bis 3 cm befürchtet werden muß, geht die Dichtheit spontan verloren. Im Versuch zeigte sich, daß dann der Luftdruckabfall von  $500 \text{ mmWS}$  auf  $50 \text{ mmWS}$ , der bei unbeschädigter Druckzone erst nach mehr als 12 Stunden eintritt, in 63 Sekunden erfolgt. Dem entspricht theoretisch eine Erhöhung der stationären Gasdurchströmung von  $0,5 \text{ cm}^3/\text{s}$  auf  $365 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Eine analoge Wirkung kann bei der Wasserdurchlässigkeit beobachtet werden: Während auf der Biegedruckseite unverletzte Versuchskörper in 8 Stunden nicht mehr als 4 Liter Wasser aufgenommen haben, die vermutlich zum größten Teil im Porengefüge gespeichert werden, flossen in der gleichen Zeit 187 l Wasser durch den Prüfkörper mit einem etwa 70 cm langen Haarriß in der Druckzone.

Die Durchlässigkeit dieses Versuchskörpers verminderte sich nach der Wassereinwirkung vermutlich sowohl durch das Einspülen von Feinanteilen aus dem Ribbereich der Zugseite als auch infolge von Nachhydratation. Es kann daher angenommen werden, daß bei diesem Versuchskörper der gesuchte Grenzwert für die zulässige Biegerotation - ca.  $\theta = 0,03 \text{ rad}$  - erreicht bzw. überschritten wurde.

In Verbindung mit einer Mindestdicke der Biegedruckzone von 2 cm ergibt sich aus



dieser Grenzrotation eine Betonstauchung von  $\epsilon_b \approx \kappa \cdot \theta = 2 \cdot 0,03 \cdot \frac{1000}{20} = 3\%$ , die größer als die unter Kurzzeitbeanspruchung ausnutzbare Betonstauchung von  $\epsilon_p = 2,2\%$  ist; daher war die eingetretene Beschädigung der Druckzone zu erwarten.

Aufgrund der bisher vorliegenden Untersuchungsergebnisse muß zur Gewährleistung der Gas- und Wasserdichtigkeit eine mindestens 3 cm dicke unbeschädigte Druckzone bei einer Betonstauchung von  $\epsilon_{bmax} = 0,7 \cdot \epsilon_p = 1,5\%$ , d.h. eine maximale Querschnittsrotation von  $\theta = 0,01$  rad bzw.  $\theta' = 5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$  gefordert werden. Unter diesen Annahmen ergibt sich eine Stahldehnung von

$$\epsilon_e = \left(\frac{h}{x} - 1\right) \cdot \epsilon_b \approx (10 - 1) \cdot 1,5 = 13,5\%$$

und somit ein Plastifizierungsgrad von  $\frac{\epsilon_e}{\epsilon_s} = \frac{13,5}{1,31} \approx 10$ .

Eine derartig starke Plastifizierung des Stahles wird nur in den wenigsten Fällen vor dem Bruch der biegebeanspruchten Stahlbetonbauteile zum Stillstand kommen. Daher lassen sich die Untersuchungsergebnisse auch wie folgt interpretieren: Gas- und Wasserdichtigkeit, d.h. die Vermeidung einer stationären Durchströmung, ist bei biegebeanspruchten Bauteilen mindestens solange gegeben, wie die statische Traglast gewährleistet ist. Prüfkörper, deren unbeschädigte Biegedruckzone unter den Versuchsbedingungen nur durchfeuchtet wird, gelten hierbei noch als dicht.

An der durchlässigen Stahlbetonplatte wurde festgestellt, daß die den Versuchskörper durchströmende Wassermenge - im Bereich bis etwa 5 mWS Druck - etwa mit dem Quadrat des Wasserdruckes zunimmt. Das Wasser-Aufnahmevermögen (Speicherung) in der Zugzone aufgerissener, aber noch wasserdichter Stahlbetonbauteile läßt sich quantitativ befriedigend mit der Wassereindringzahl, s./4/, beschreiben. Bei den als gas- und wasserdicht eingestuften Versuchskörpern konnte weder eine Abhängigkeit der Wasseraufnahme bzw. der Luftdruckabnahme von der Biegerotation oder von der Dicke der unbeschädigten Druckzone, noch ein von der Biegerotation oder der Dicke der unbeschädigten Druckzone von der Wasseraufnahme oder der Luftdruckabnahme noch ein gesetzmäßiger Zusammenhang zwischen Wasser- und Gasdichtigkeit hergestellt werden.

Weitere Untersuchungen gleicher Zielsetzung sollten an Versuchskörpern mit vorgegebenen Rissen durchgeführt werden, um die Abhängigkeit der Dichtigkeit von der Biegerotation genauer ermitteln zu können.

#### Literatur:

/1/ Graf, O. und Walz, K.:

Versuche und Erläuterungen zu den Richtlinien für die Prüfung von Beton auf Wasserundurchlässigkeit. Die Bautechnik 15 (1937), S. 321.

/2/ Walz, K.:

Undurchlässiger Beton. Bautechnik Archiv, Heft 13, Berlin 1956.

/3/ Würfel, H.:

Betonarbeiten an den Mittelweserstaustufen Vortrag auf der 52. Hauptversammlung des Dt. Beton-Vereins in Hamburg 1955.

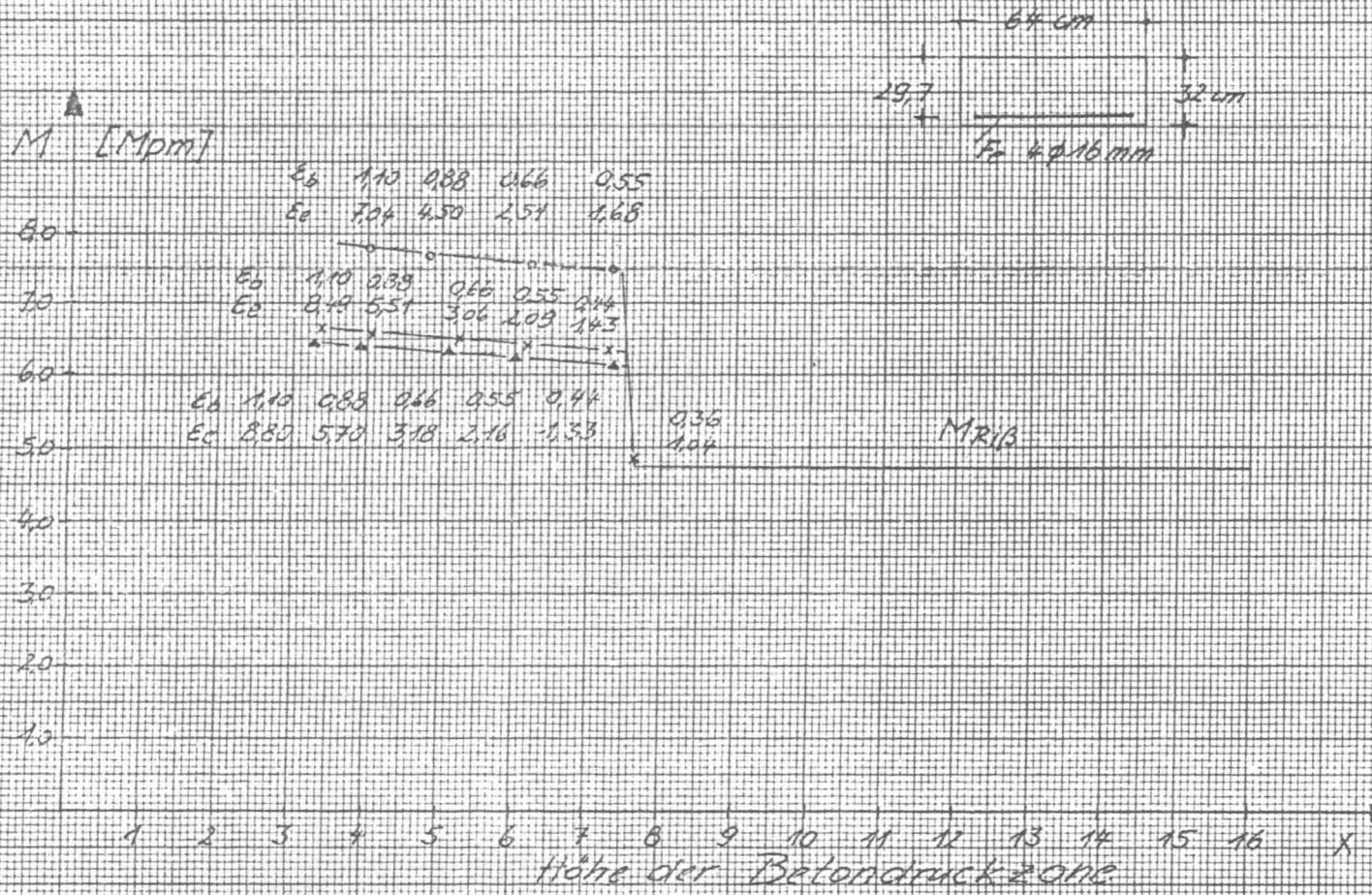
/4/ Künzel, H./Schwarz, B.:

Die Feuchtigkeitsaufnahme von Baustoffen bei Beregnung. Berichte aus der Bau-forschung, Heft 51, Berlin 1968.

# **A N L A G E N**

**zu**

**Teil A: Statistische Vorbelastung der Prüfkörper**



$\epsilon_b$	1.10	0.88	0.66	0.55
$\epsilon_c$	7.04	4.58	2.51	1.68

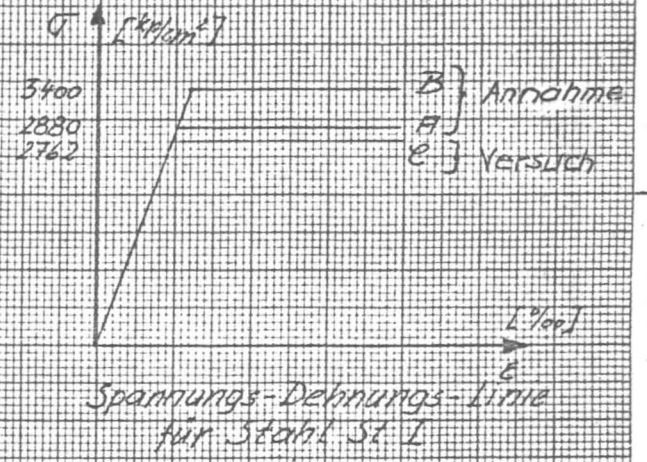
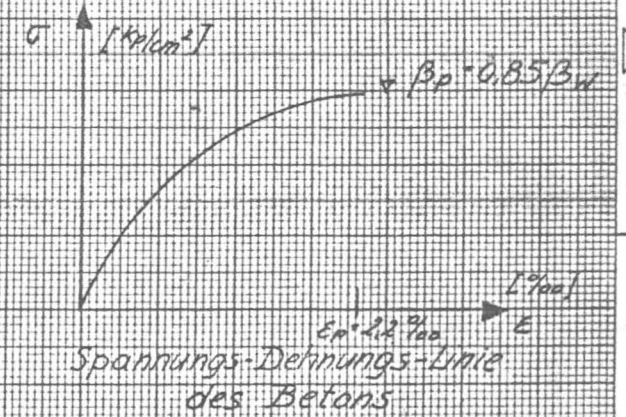
  

$\epsilon_b$	1.10	0.88	0.66	0.55	0.44
$\epsilon_c$	8.49	5.51	3.06	2.03	1.43

$\epsilon_b$	1.10	0.88	0.66	0.55	0.44
$\epsilon_c$	8.80	5.70	3.18	2.16	1.33

0.36  
1.04



Symbol	Stahlarbeitslinie
x	H
o	B
▲	E

Versuchsplatte 1.1, 1.2 u. 6.

Betongüte  $B_{n250} \hat{=} \beta_w = 300 \text{ kN/cm}^2$

Anlage - 1 -



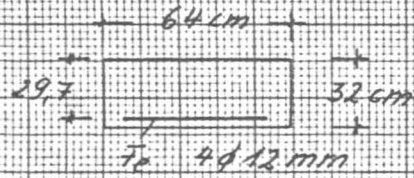
M [Mpm]

8.0  
7.0  
6.0  
5.0  
4.0  
3.0  
2.0  
1.0

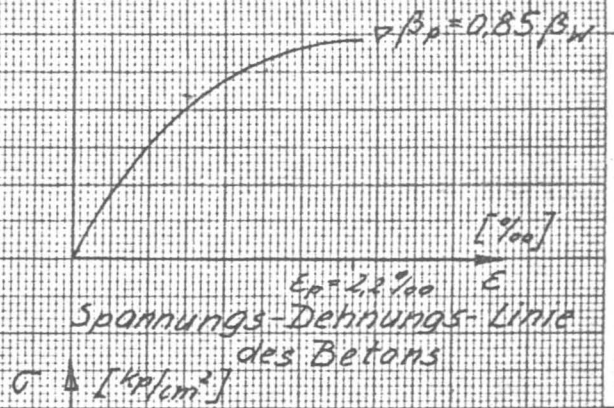
$E_b$	1.10	0.80	0.66	0.55	0.44
$E_s$	12.24	8.02	4.53	3.12	1.96

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 X

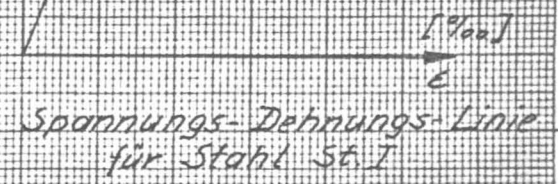
$$M_{RiB} = \frac{32^2 \cdot 64}{6} \cdot \frac{225}{7} = 3,5 \text{ Mpm}$$



$\sigma$  [kp/cm<sup>2</sup>]



2762



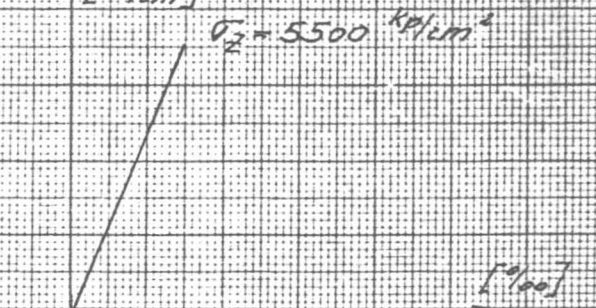
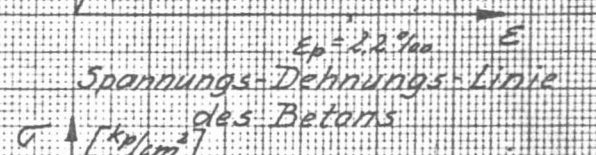
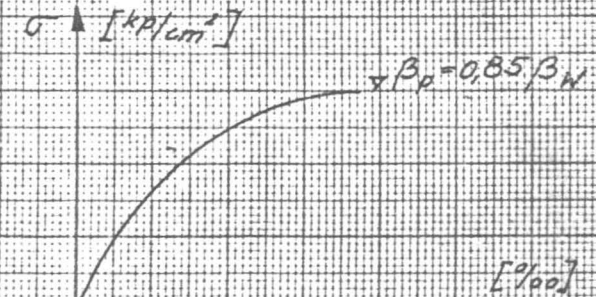
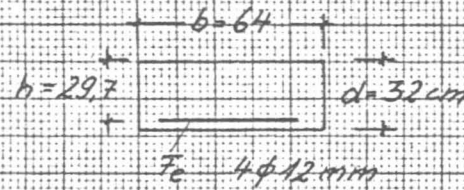
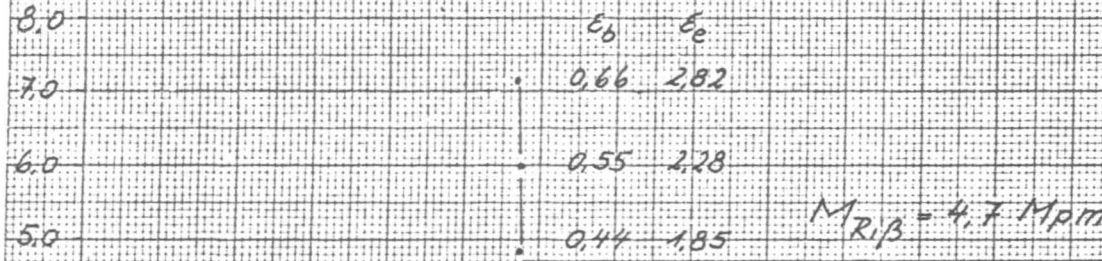
Versuchsplatte 3.1 u. 3.2

Betongüte  $\beta_w = 225 \text{ kp/cm}^2$

Anlage - 2 -



$M$  [Mpm]

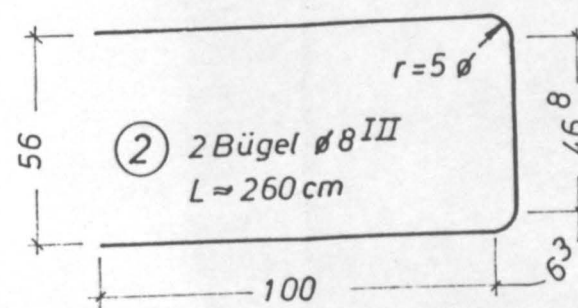
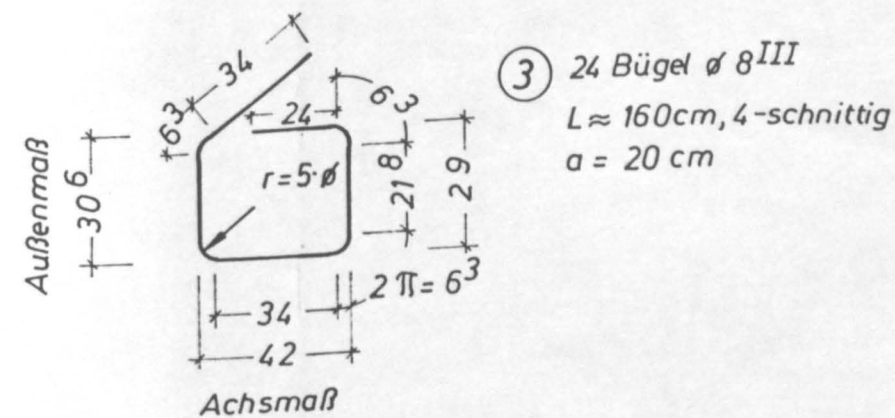
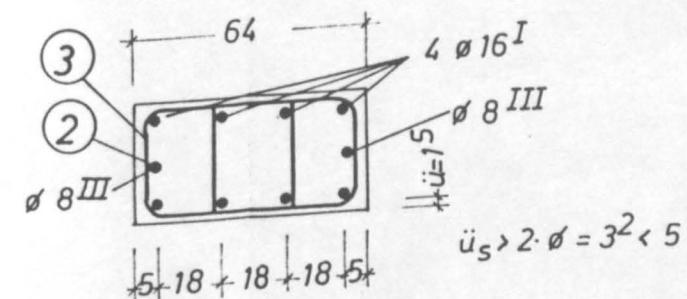
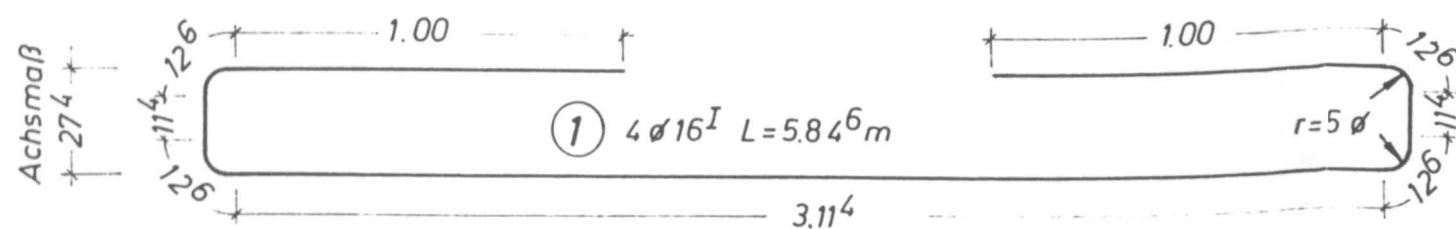
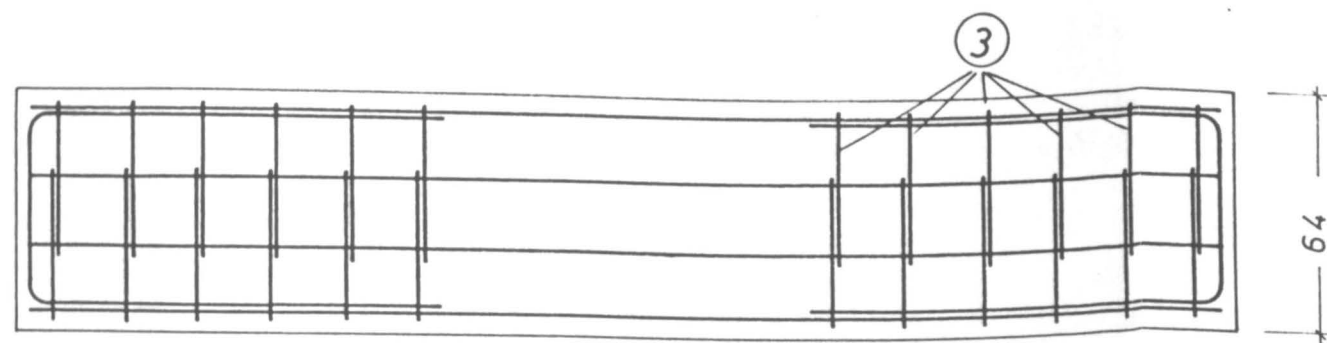
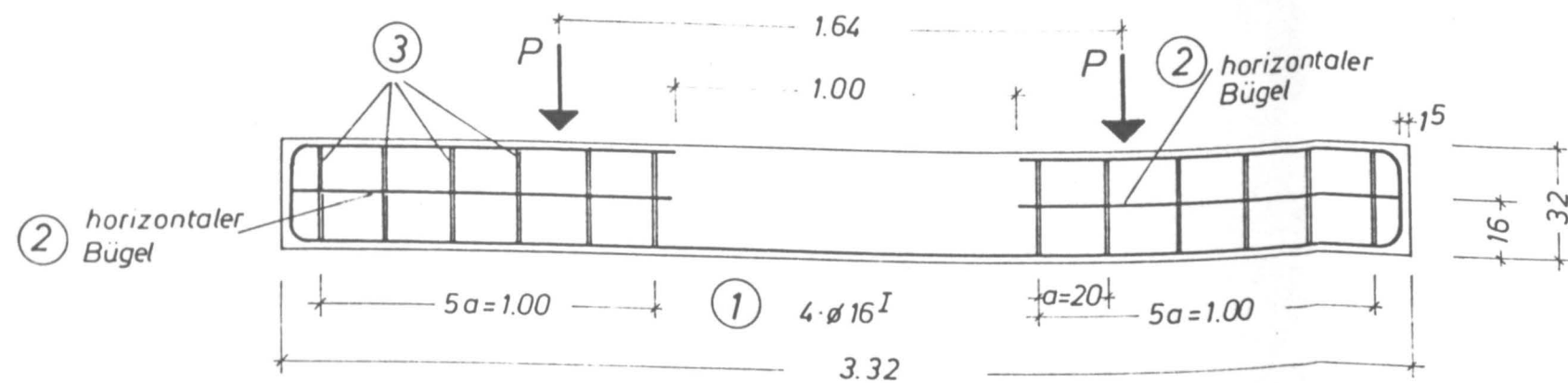


Höhe der Betondruckzone

Versuchsplatte 5.1 u. 5.2

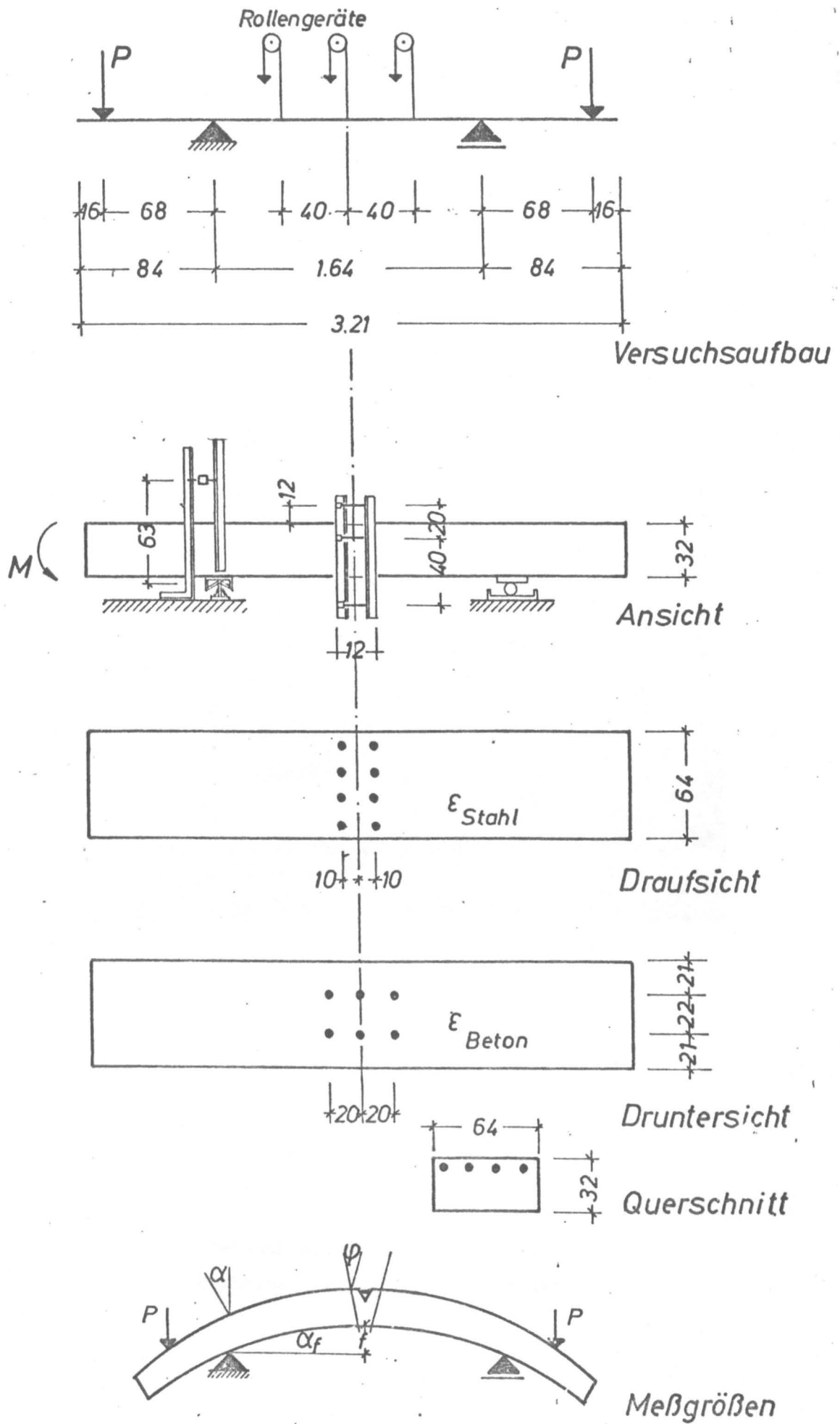
Betongüte Bn 250  $\hat{=}$   $\beta_W = 300 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$

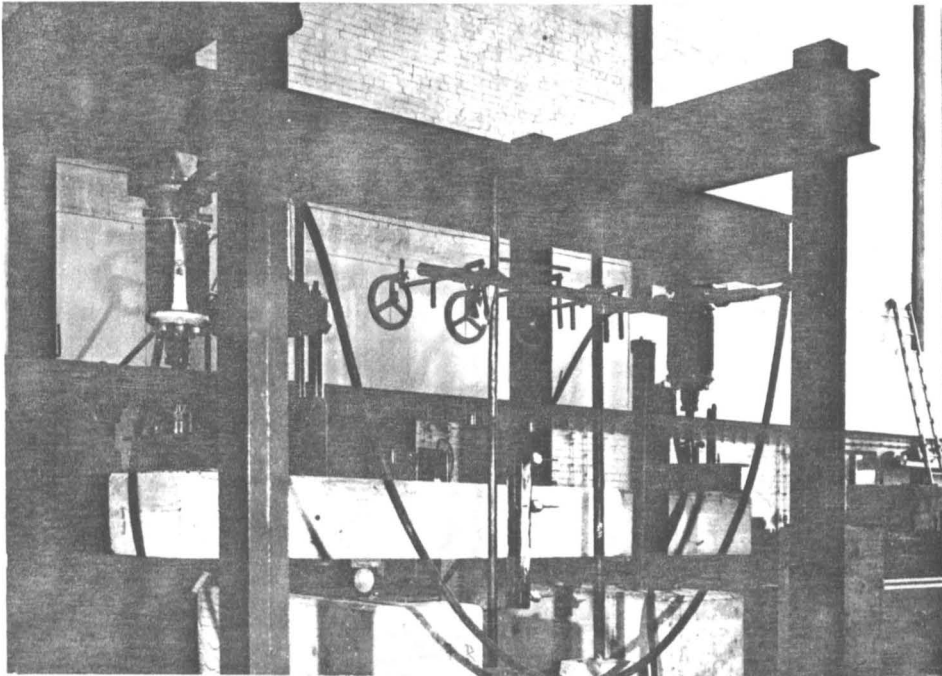
Anlage - 3 -



Versuchsplatte	Stahlsorte	Bewehrung $\phi$ in mm
1.1 - 1.4	St I	4 $\phi$ 16
3.1 - 3.4	St I	4 $\phi$ 12
4	St III b	6 $\phi$ 16
5.1 u. 5.2	St III b	6 $\phi$ 12
6	St I gerippt	4 $\phi$ 16

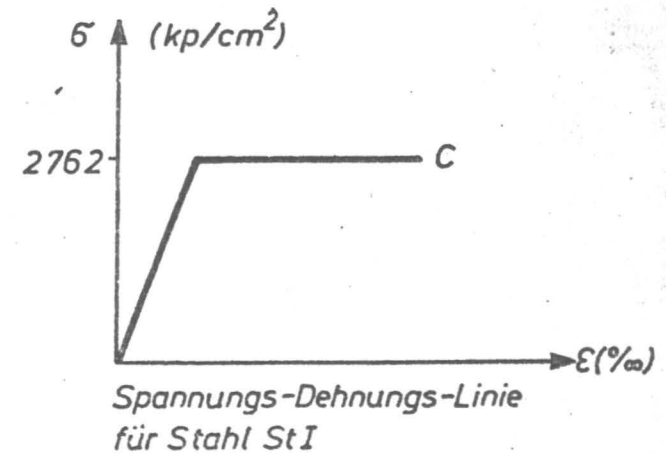
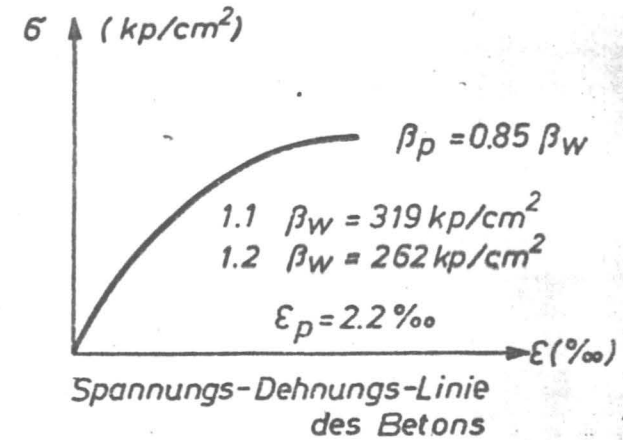
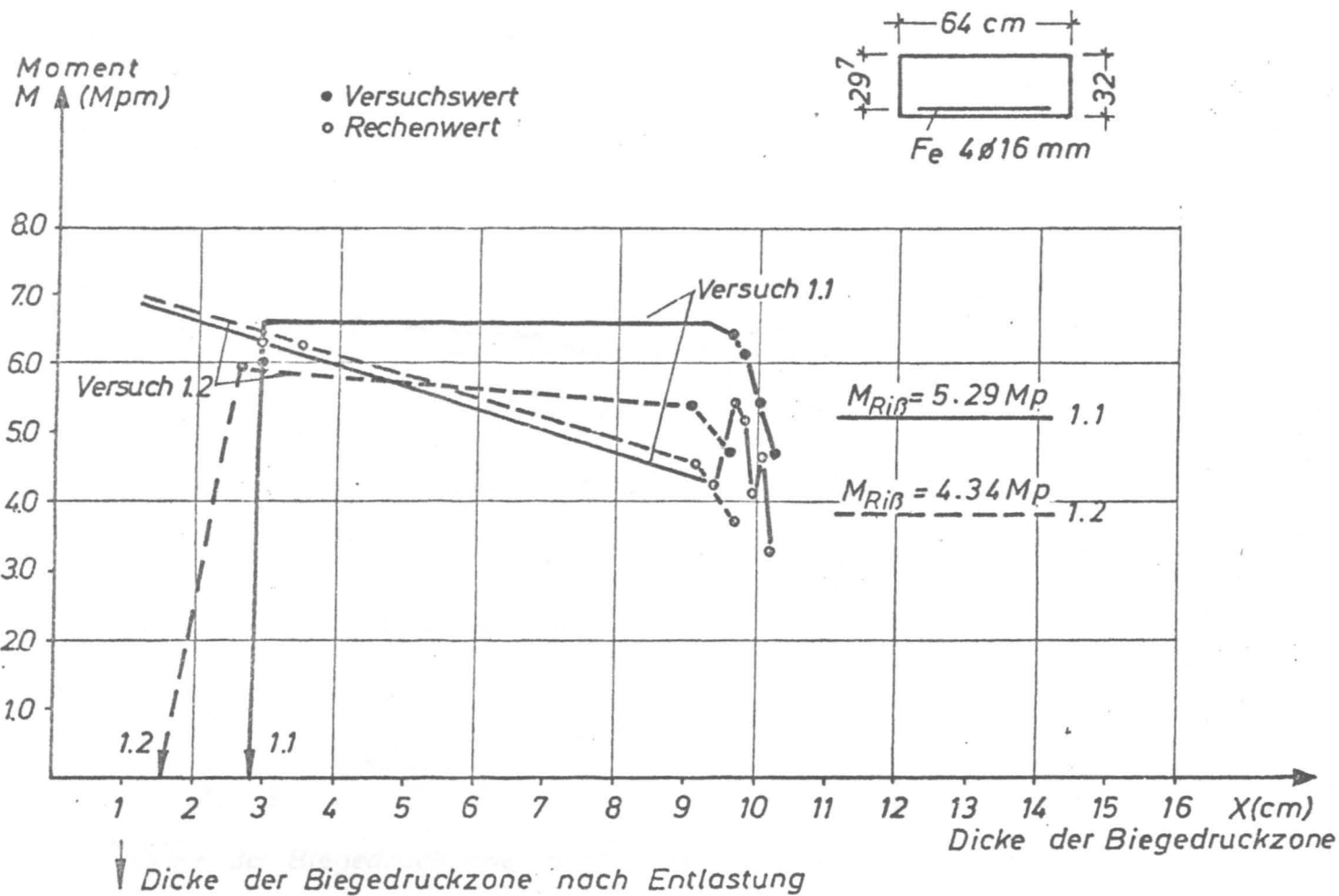




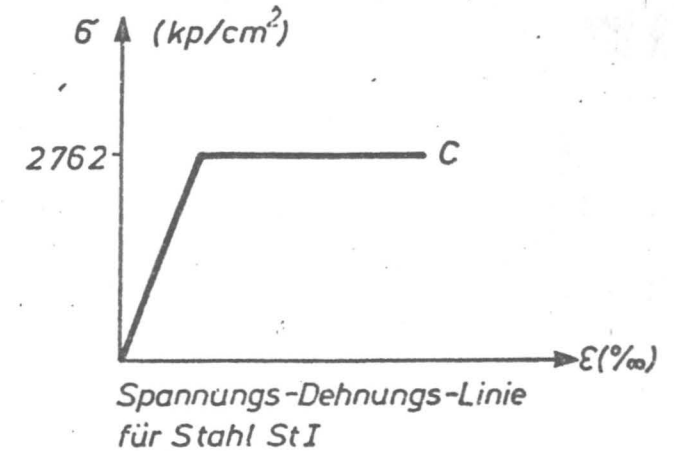
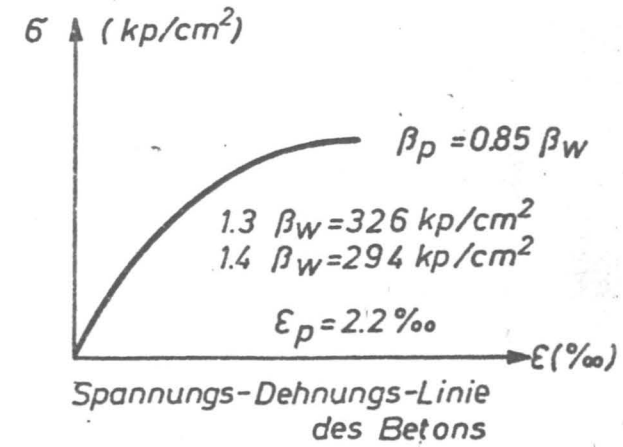
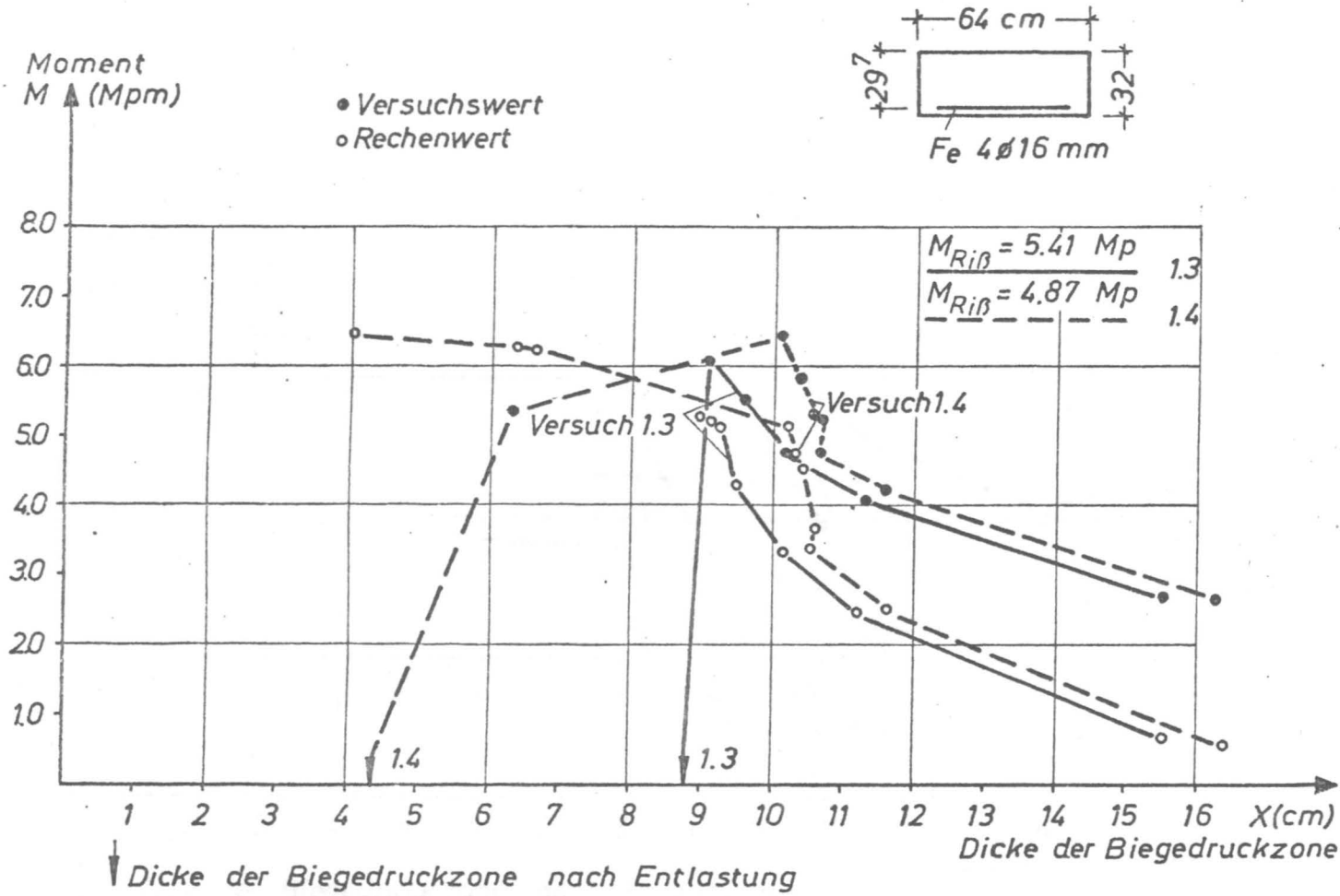


Versuchsaufbau zur statischen  
Vorbelastung der Plattenstreifen

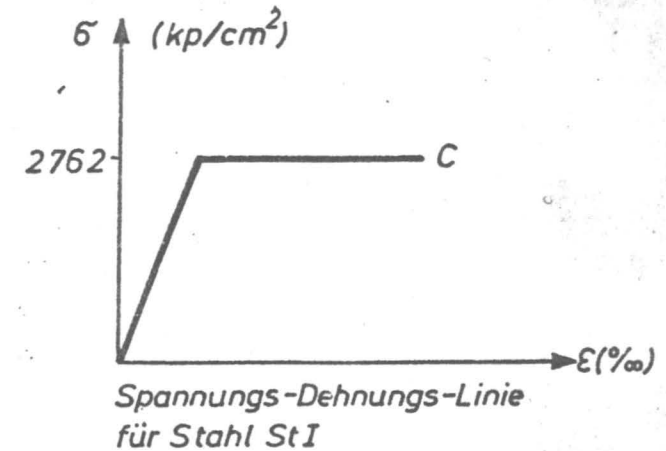
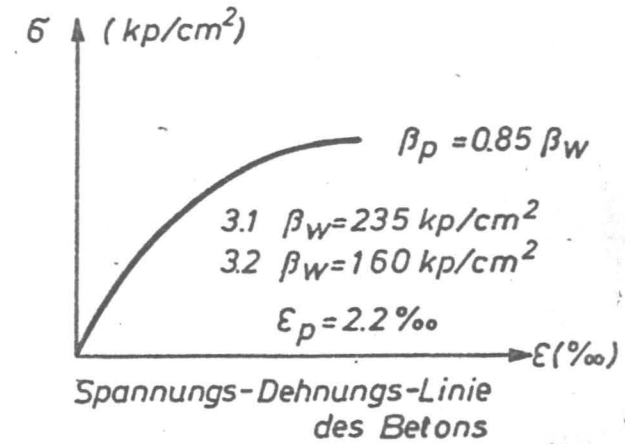
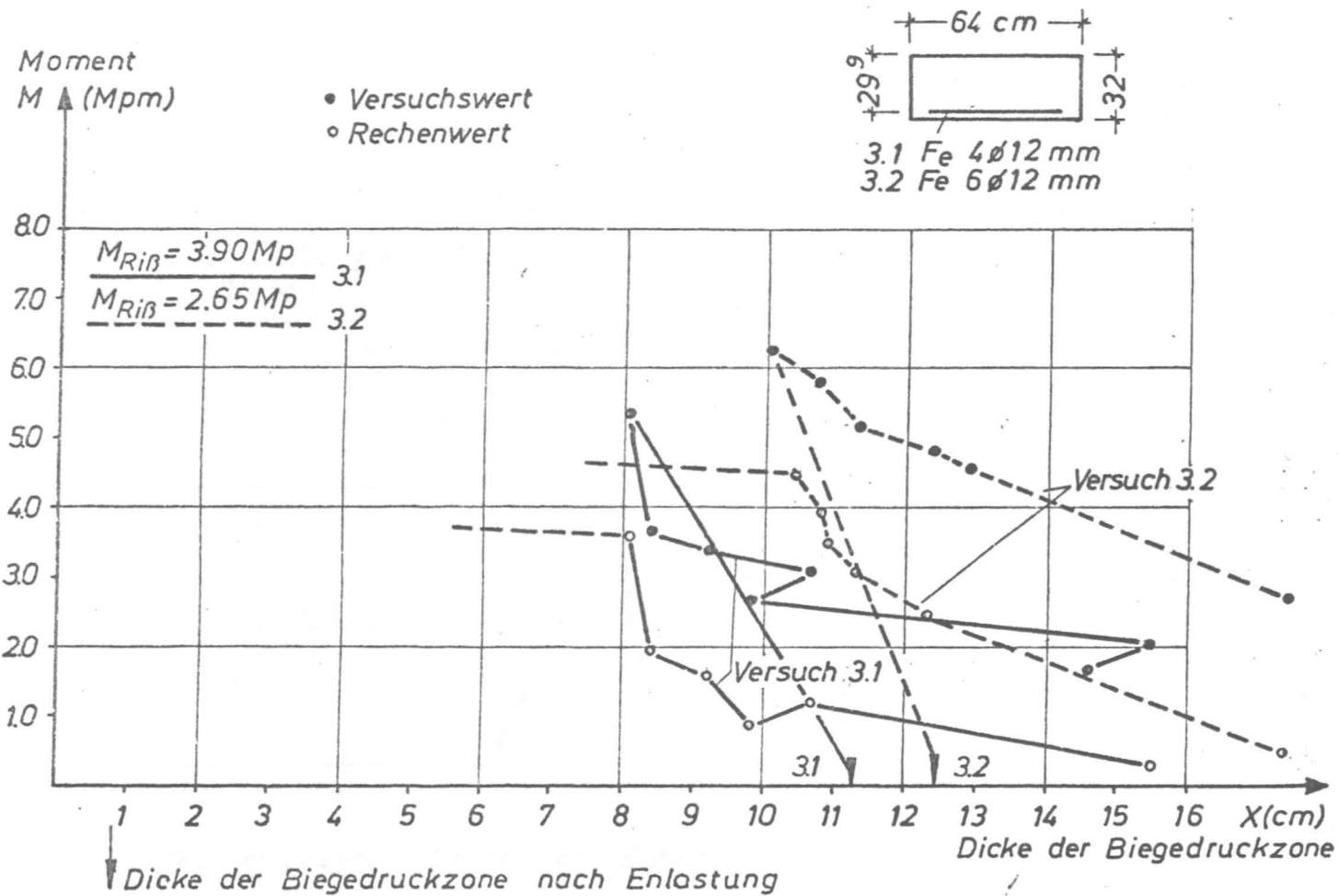
Anlage 6



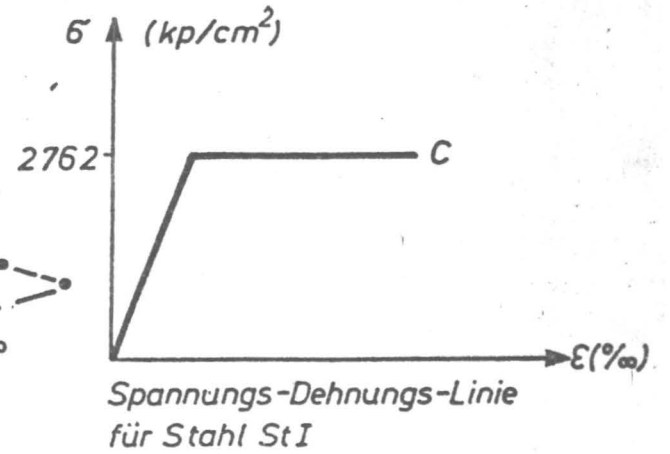
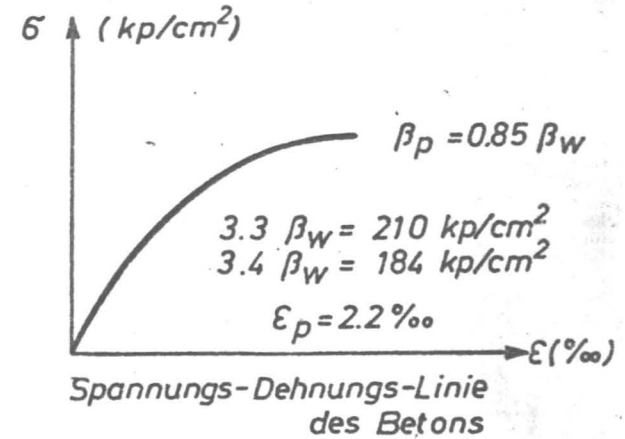
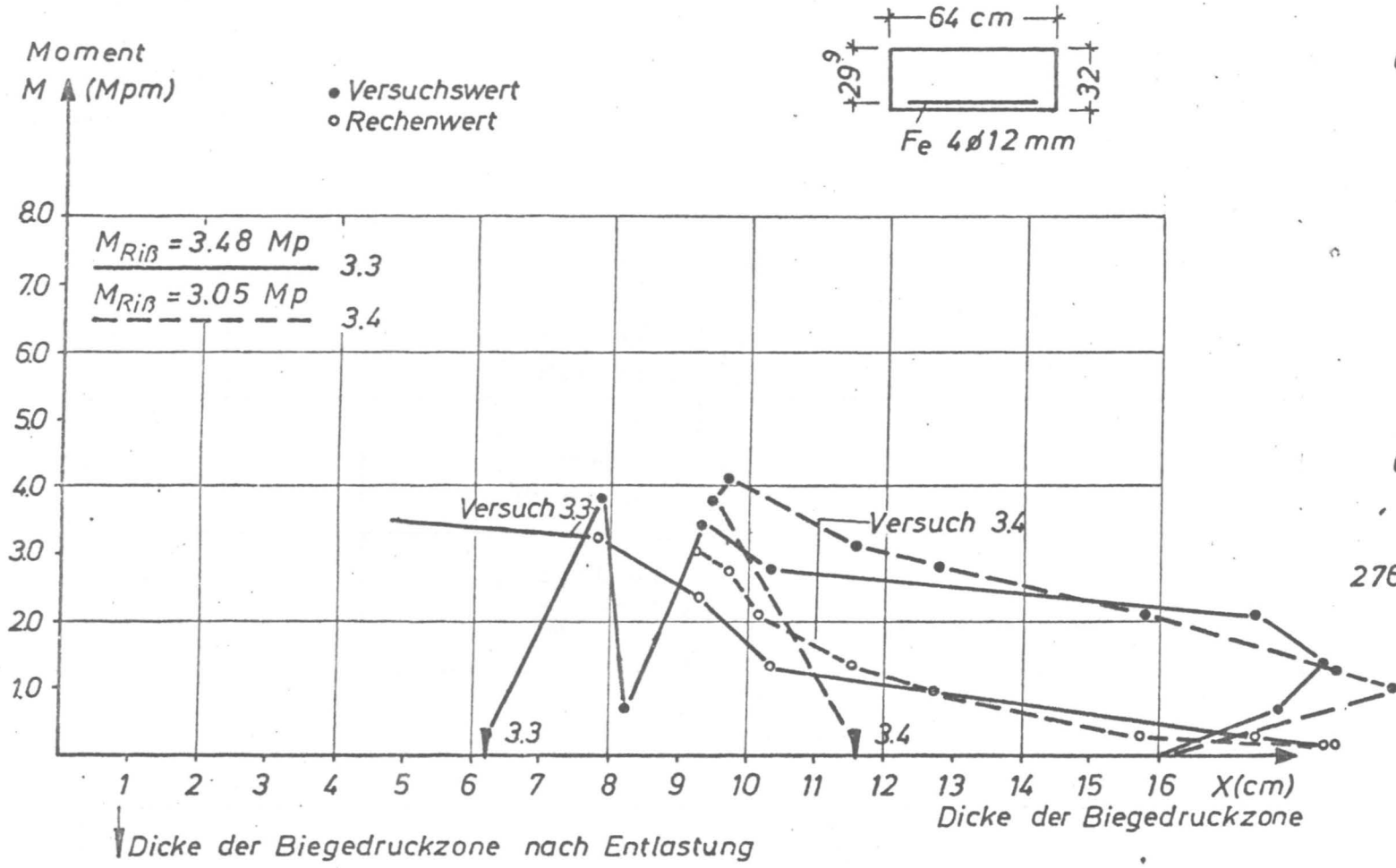
Versuchsplatte 1.1 und 1.2  
Anlage 7



Versuchplatte 1.3 und 1.4  
Anlage 8

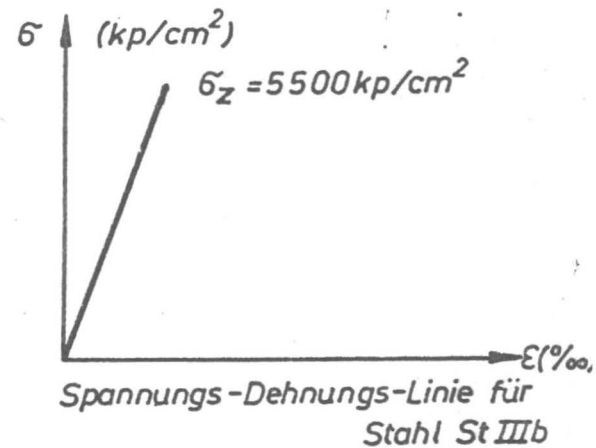
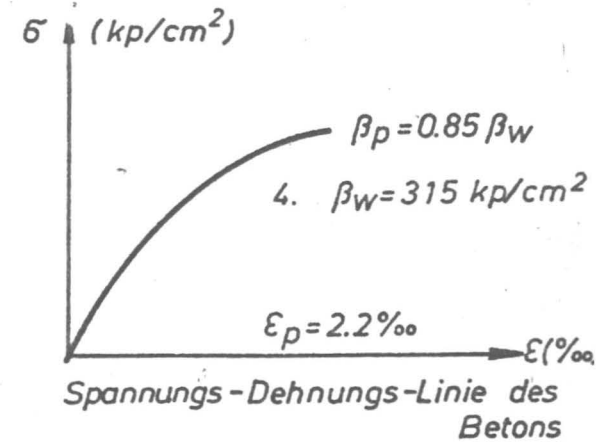
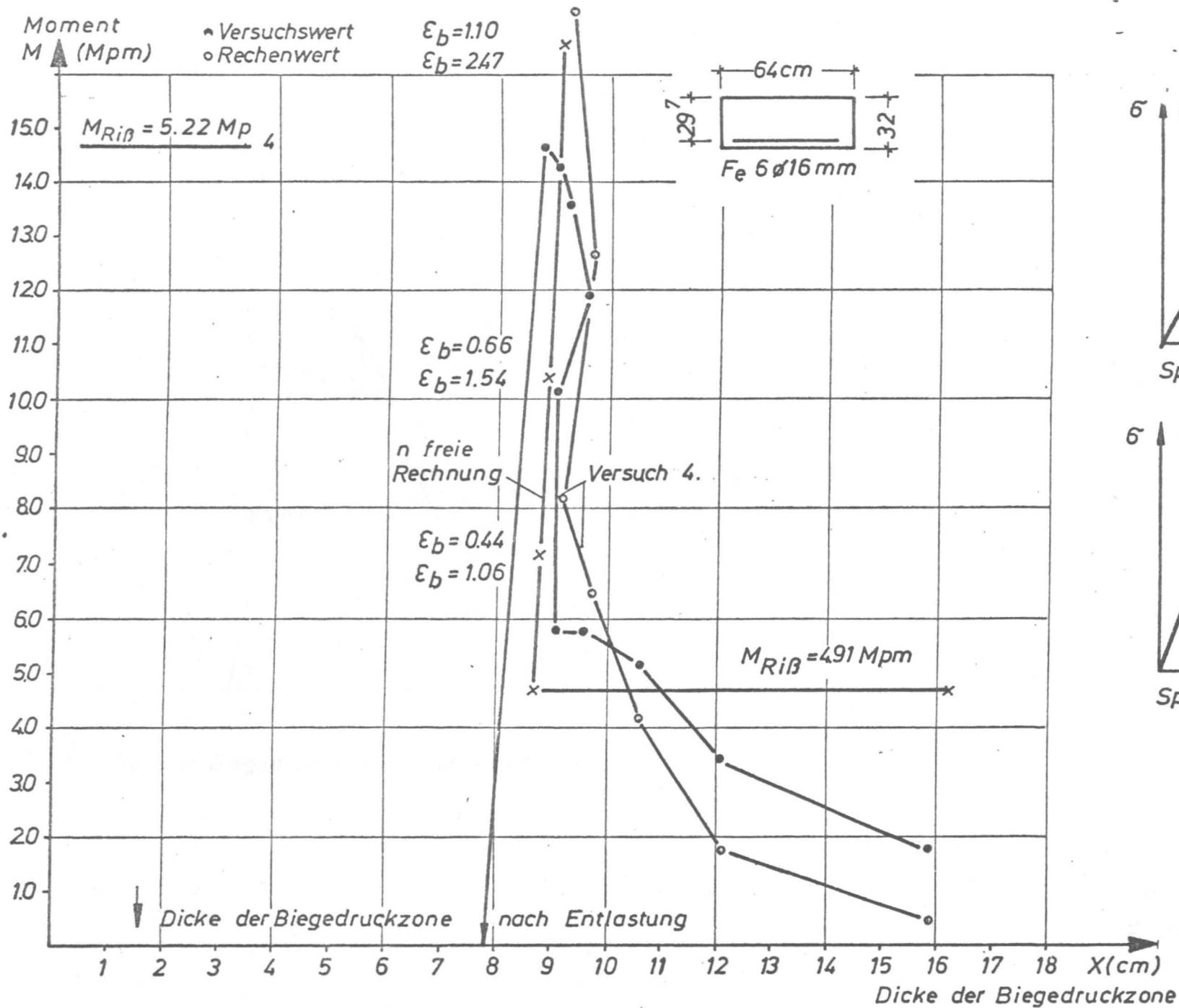


Versuchsplatte 3.1 und 3.2  
Anlage 9

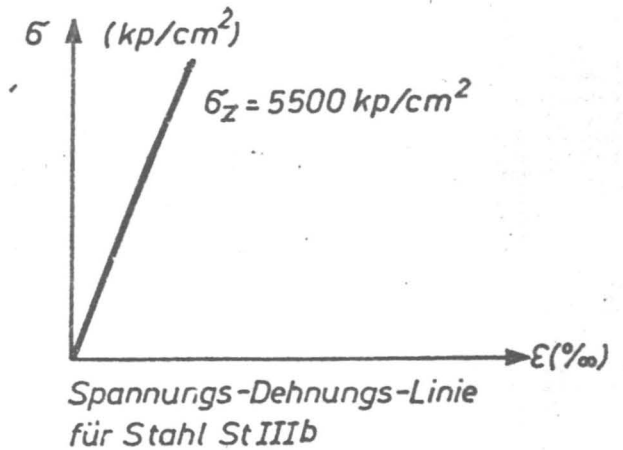
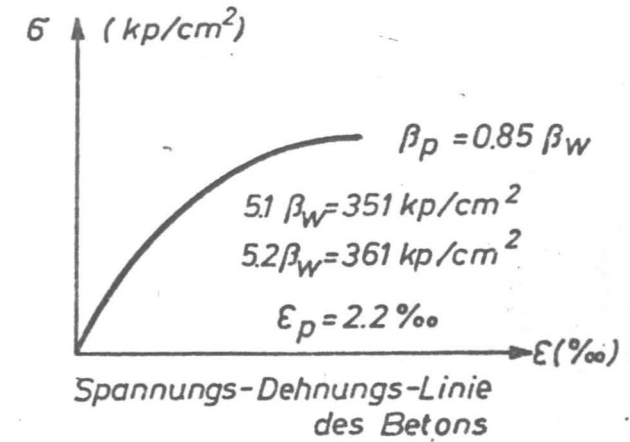
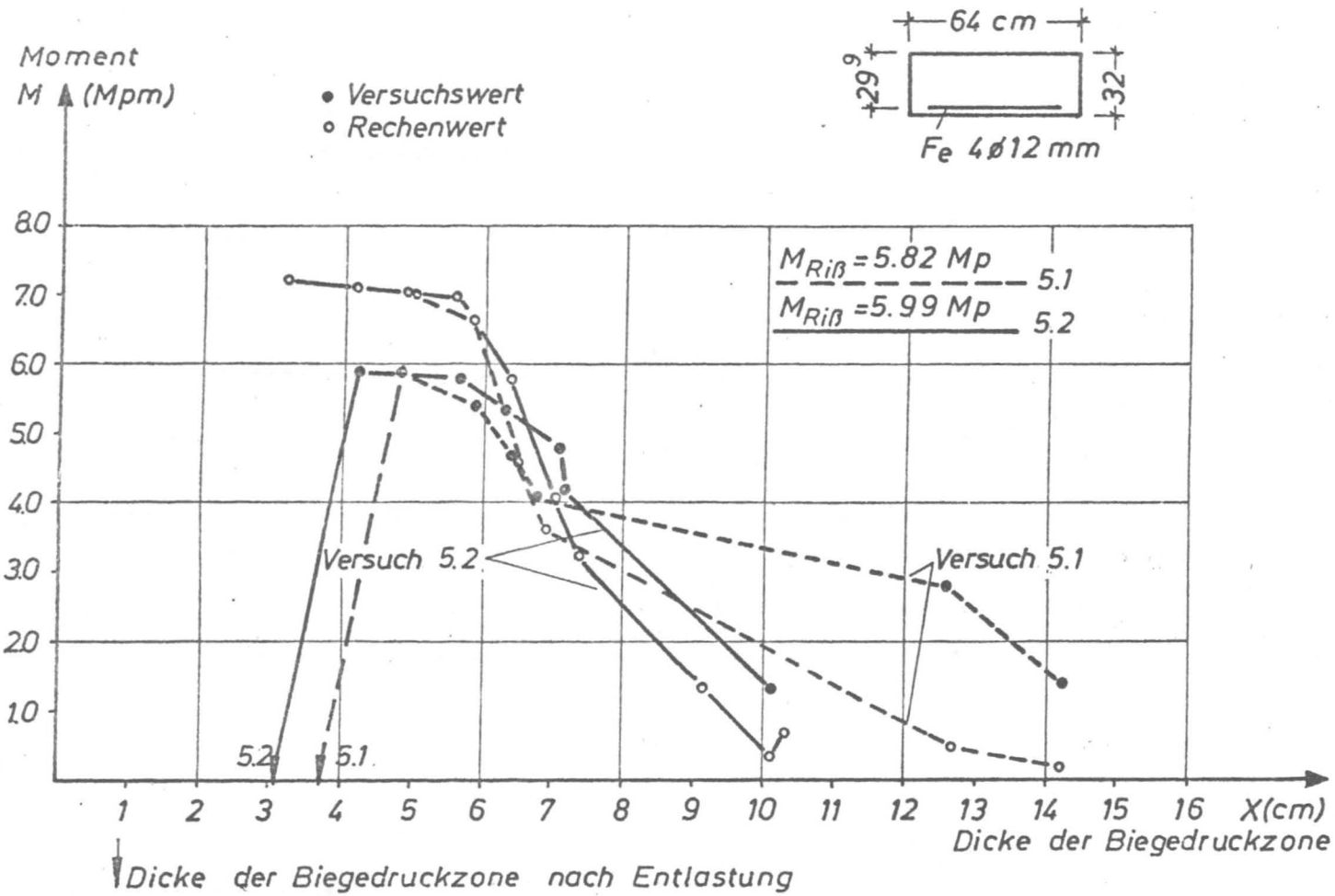


Versuchsplatte 3.3 und 3.4  
Anlage 10

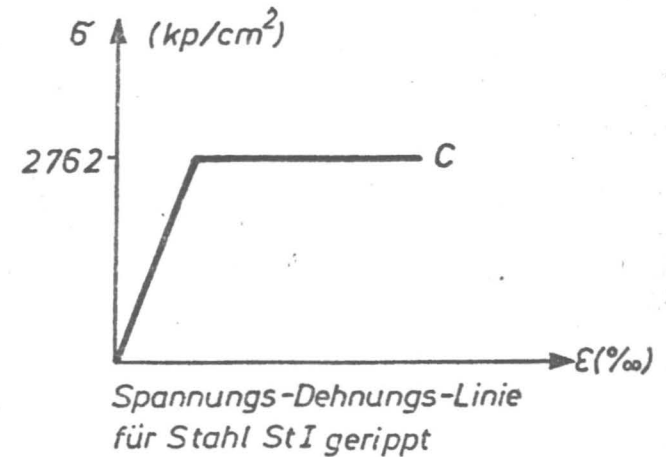
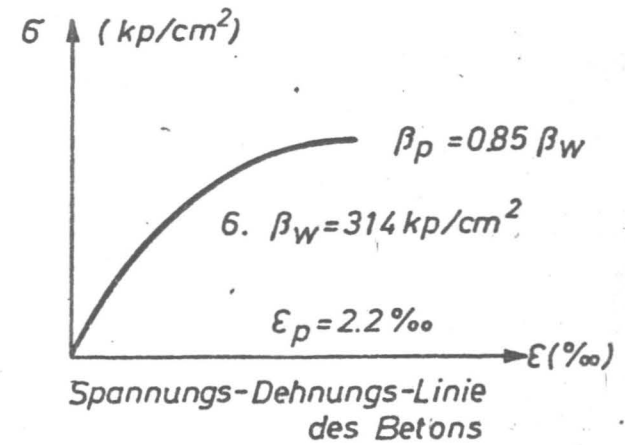
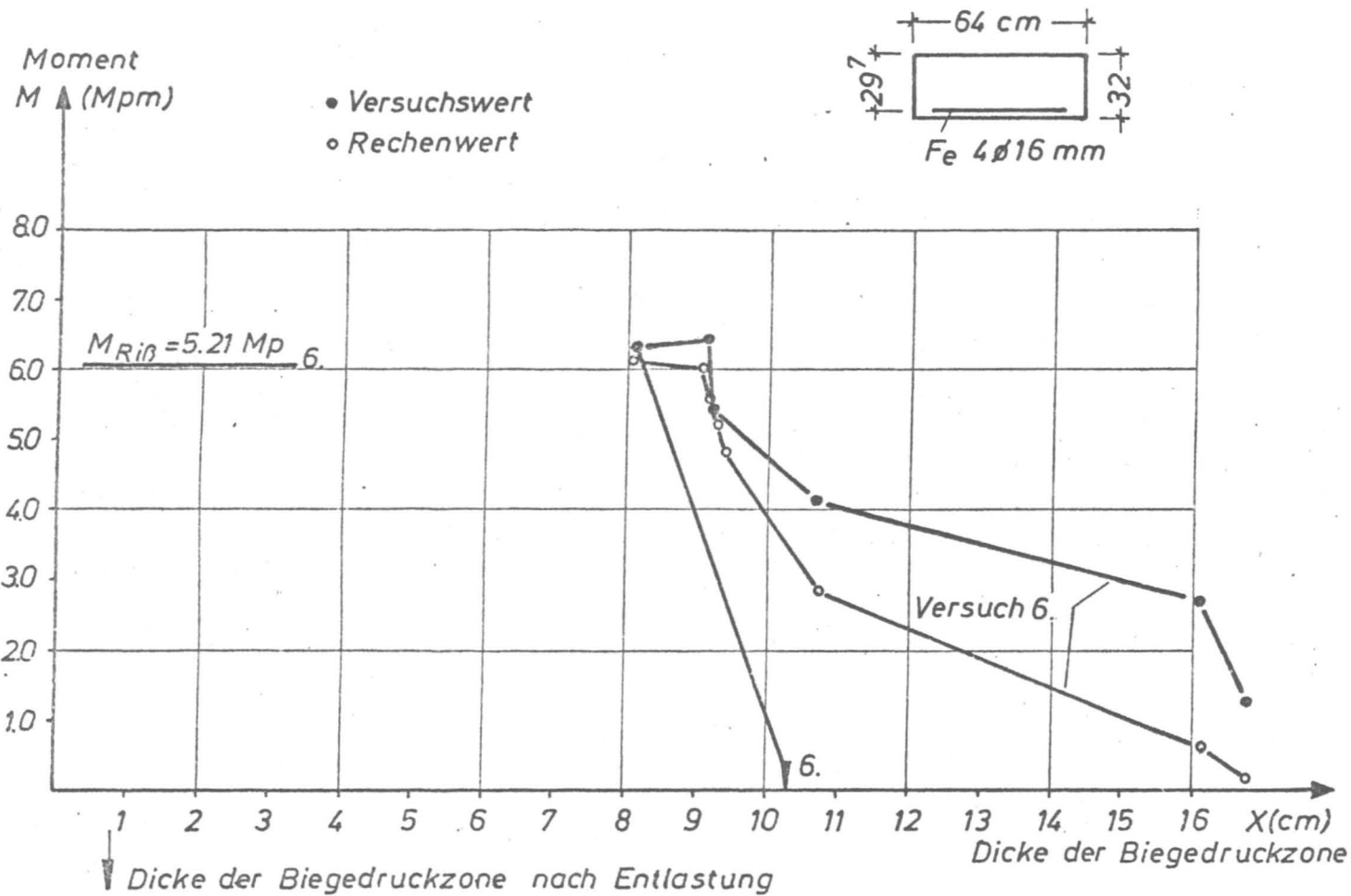




Versuchsplatte 4.  
Anlage 11



Versuchsplatte 5.1 und 5.2  
Anlage 12



Versuchsplatte 6.  
Anlage 13

## **A N L A G E N**

**zu**

**Teil B: Untersuchung der Gas- und Wasserdichtigkeit**

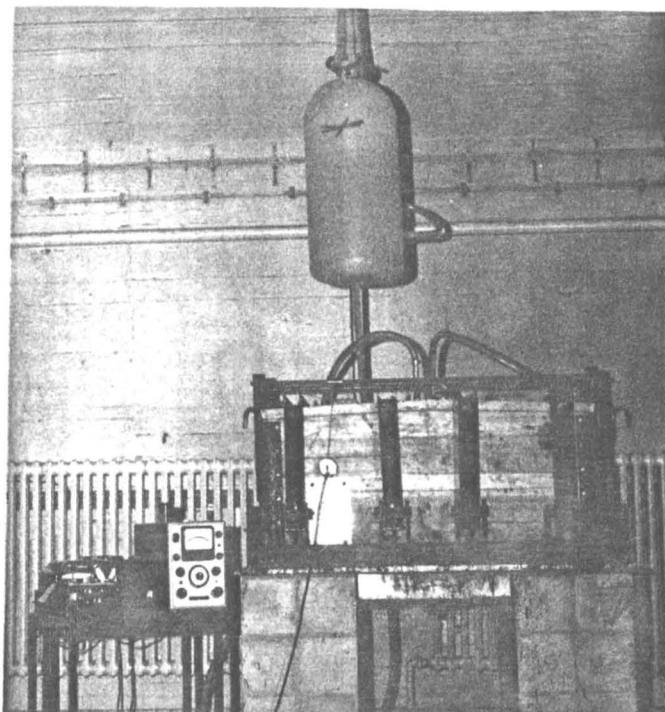


Bild 1: Gesamtansicht

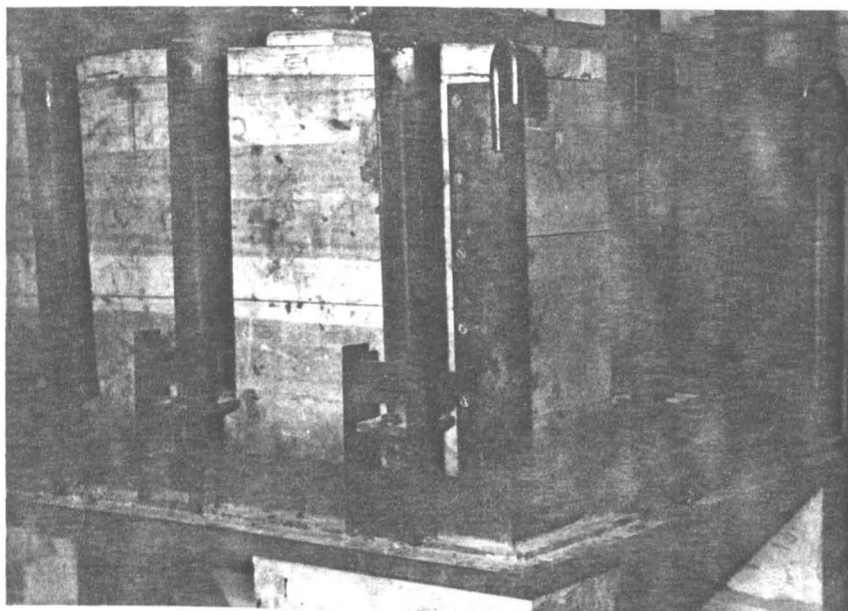


Bild 2: Detail von Bild 1:  
Kraftschlüssige Verbindung zwischen Haube  
und Grundplatte

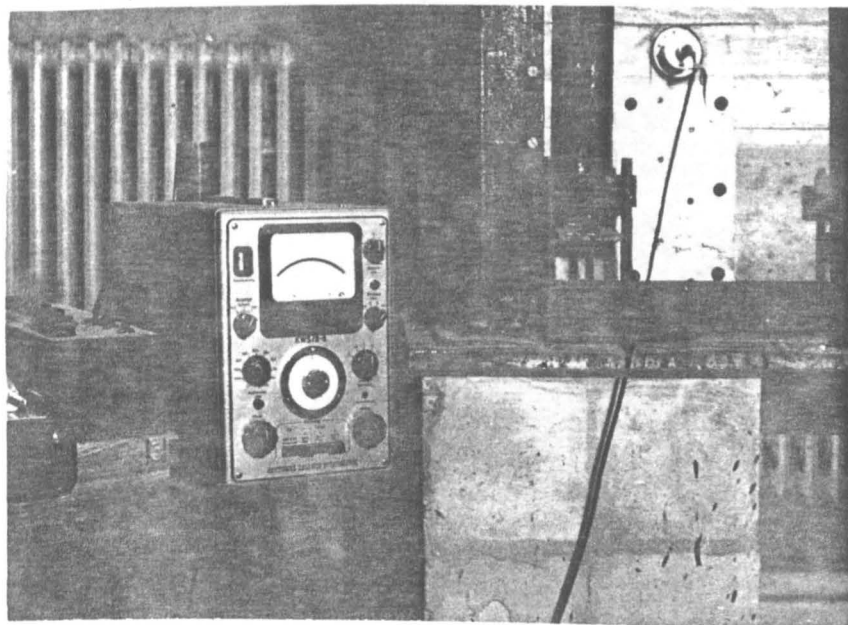


Bild 3: Detail von Bild 1:  
Druckmeßdose, Meßbrücke  
und Pegelschreiber zur  
Ermittlung der Luft-  
druckänderung im Prüf-  
raum

Prüfstand zur Bestimmung der  
Gas- und Wasserdichtigkeit

Anlage 1

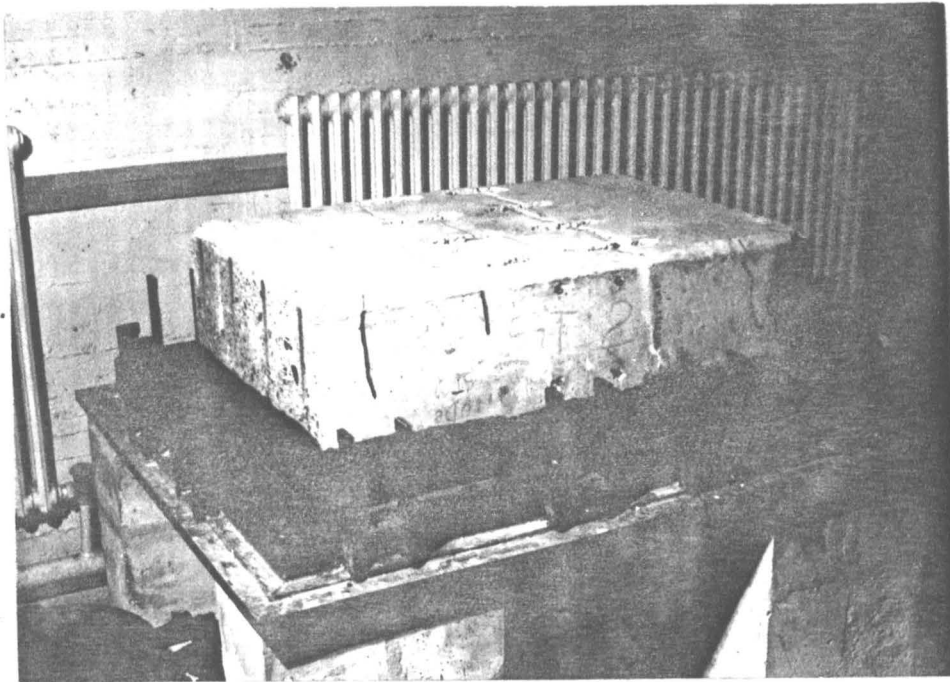


Bild 4: Versuchskörper 1.2  
auf dem Prüfstand

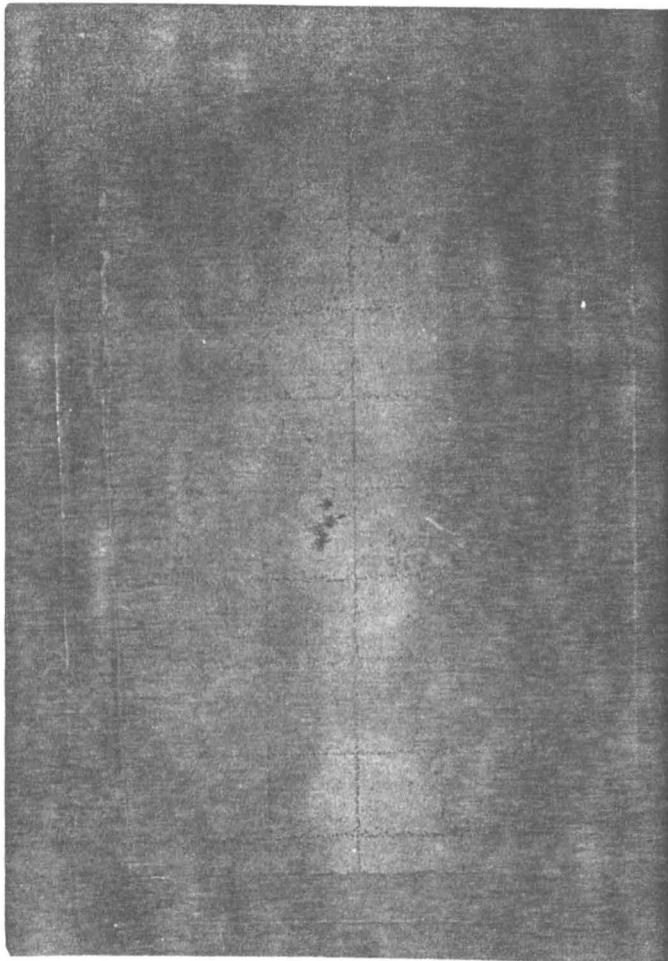
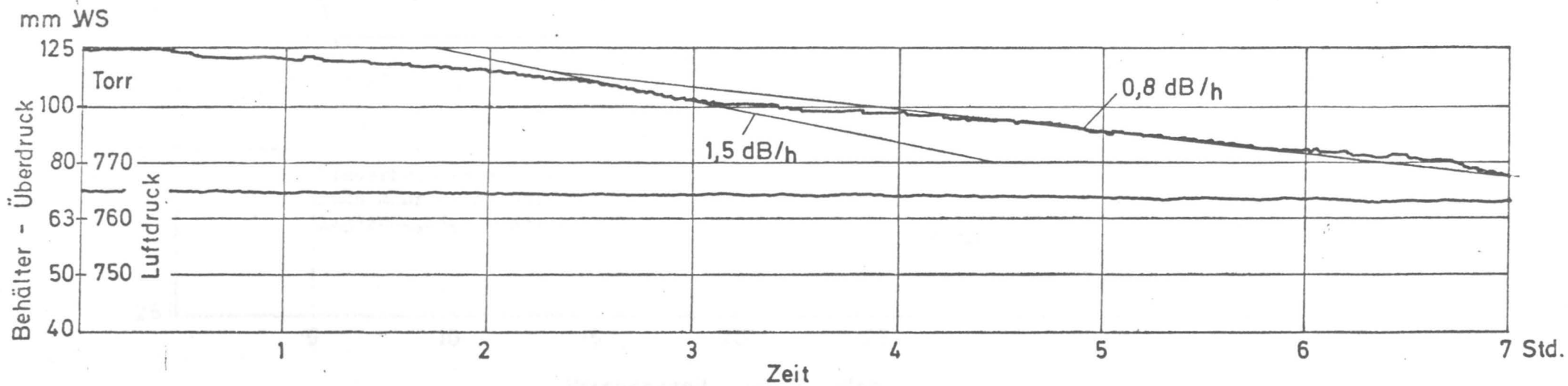
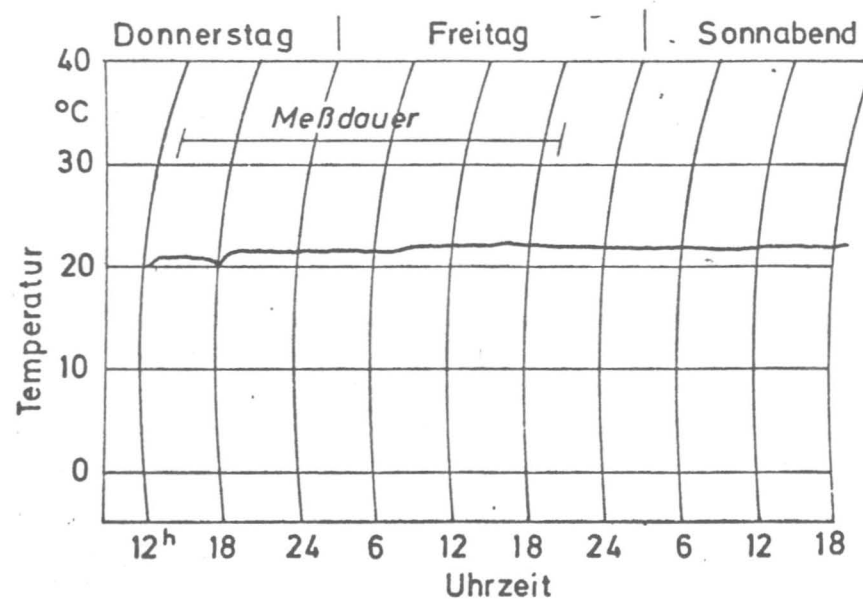
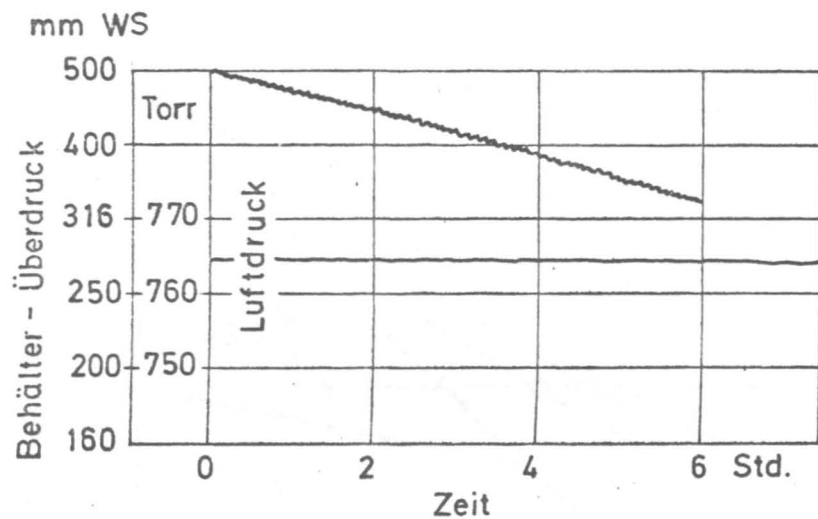


Bild 5: Versuchskörper 5.1 unmittel-  
bar nach Abschluß der  
Prüfungen

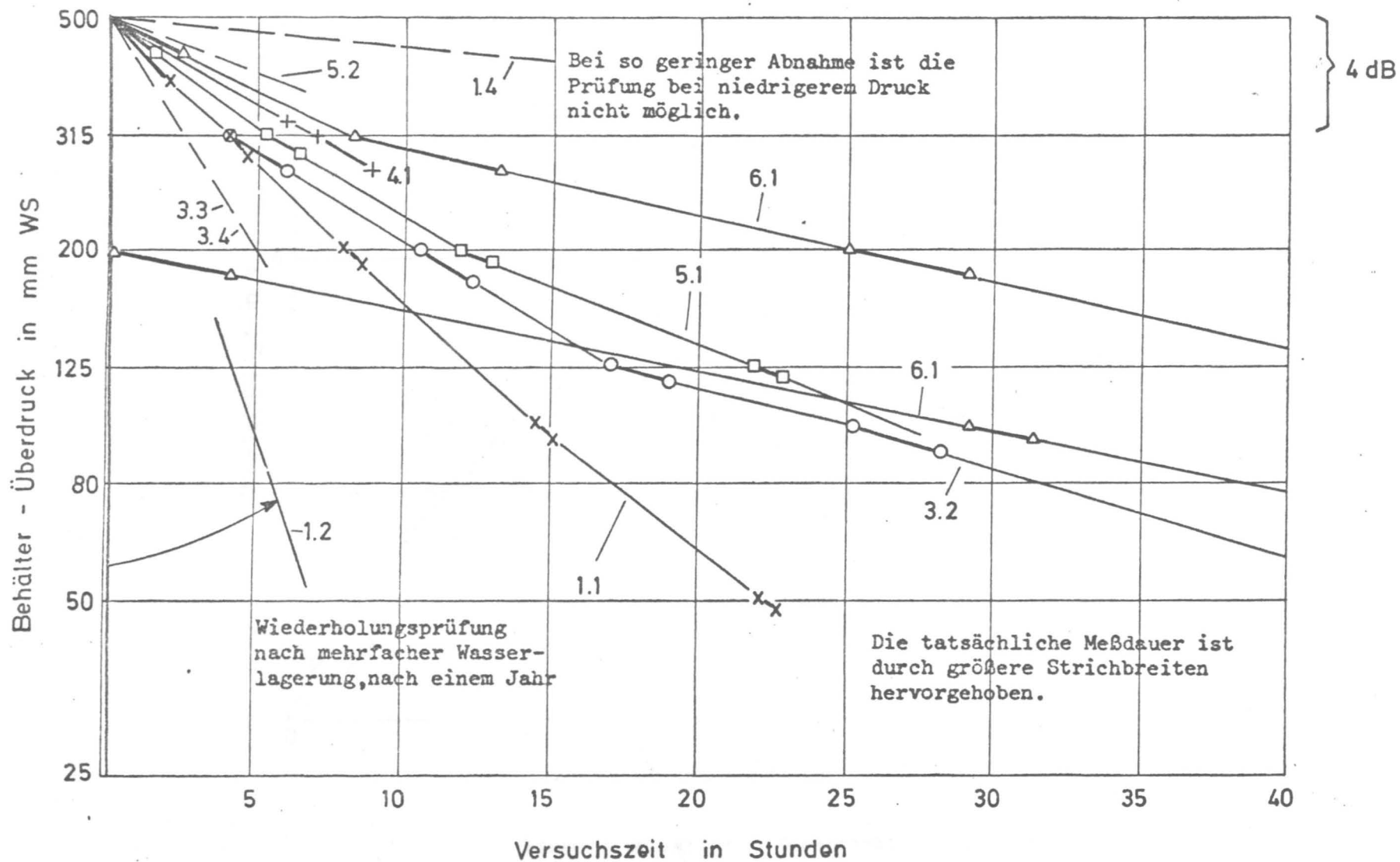
Versuchskörper

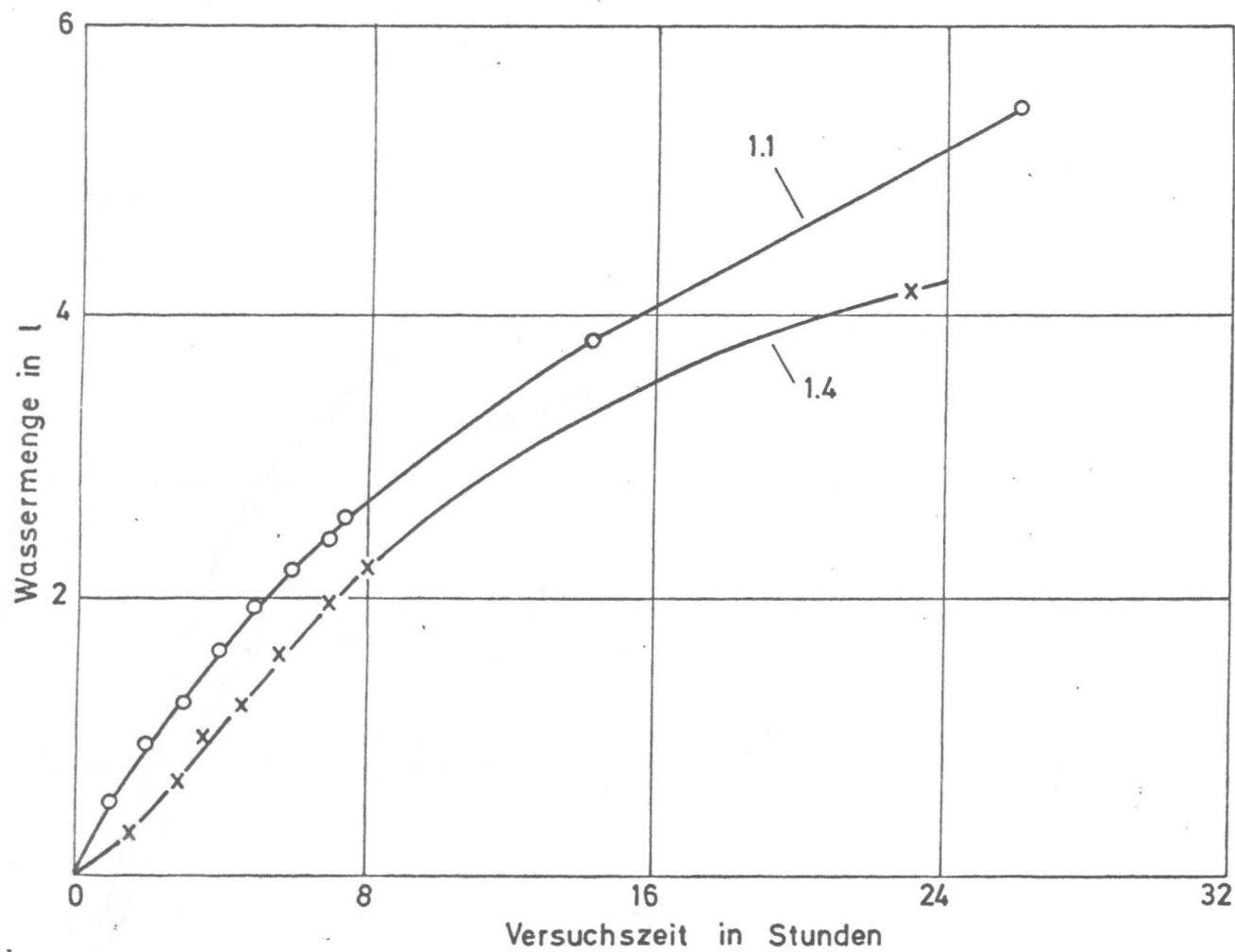




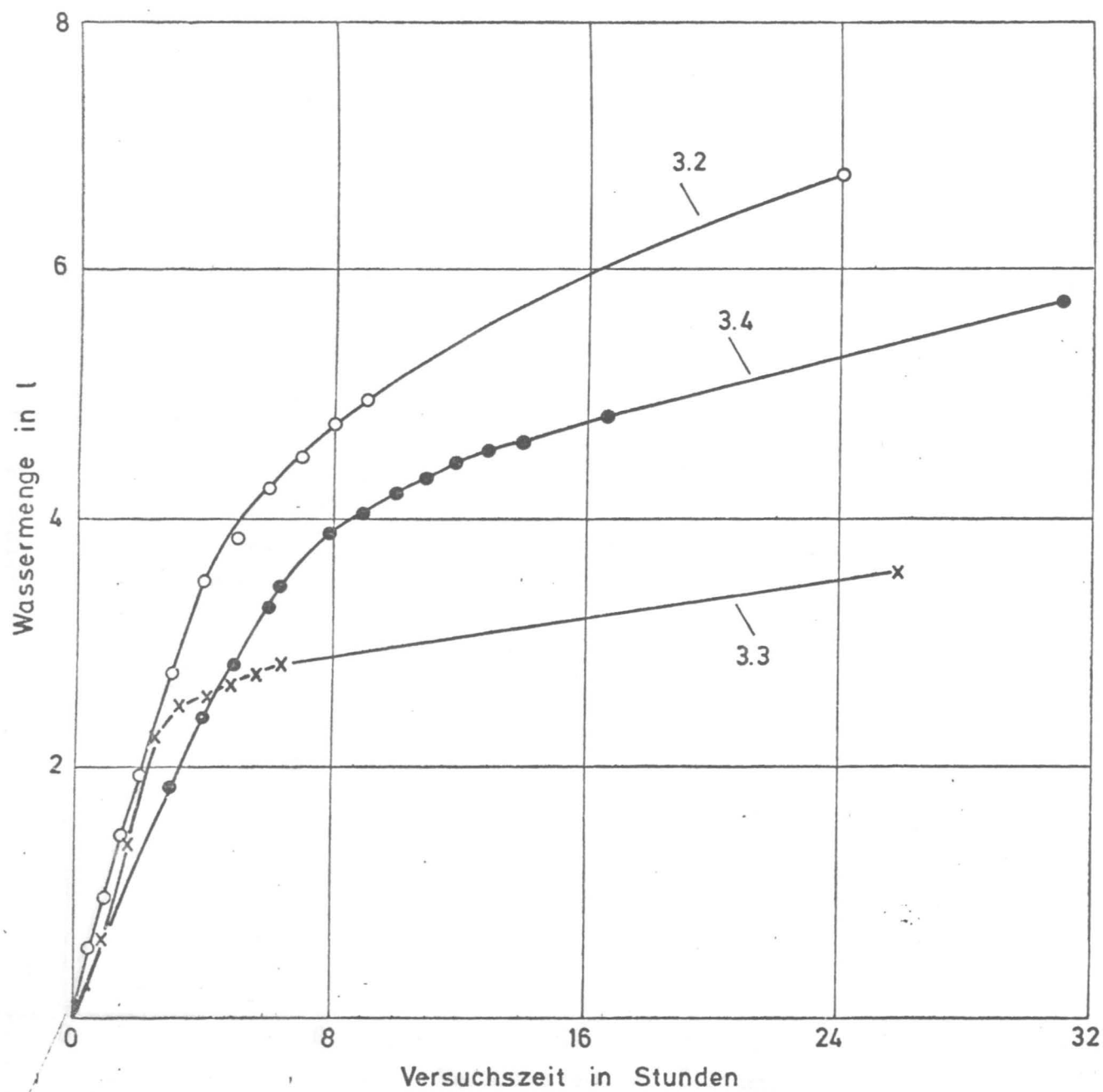
Beispiel für die Bestimmung der Gasdichtigkeit  
- Versuchskörper 4.1 -

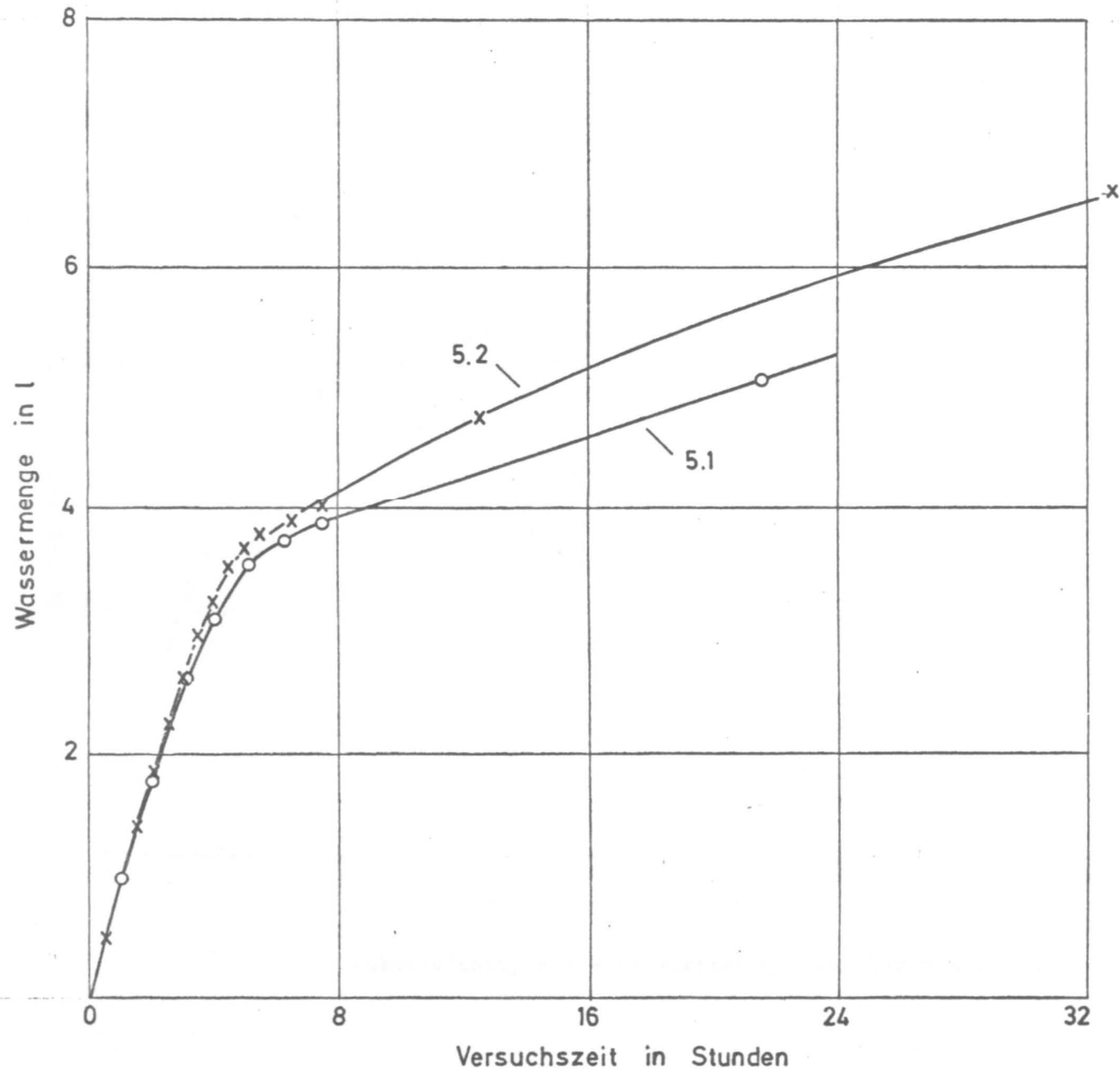
Anlage 3



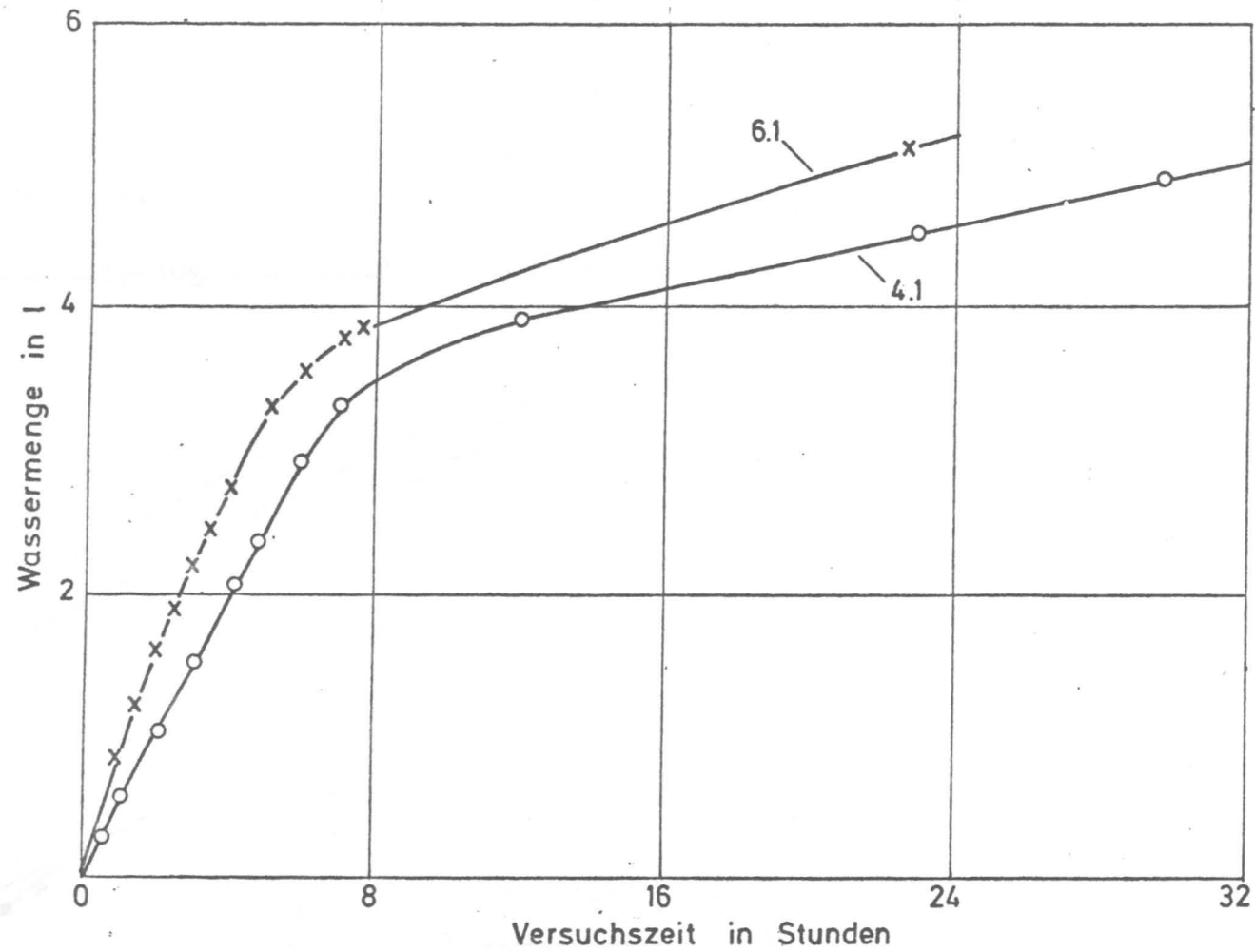


Wasserdichtigkeit - Versuchskörper der Serie 1



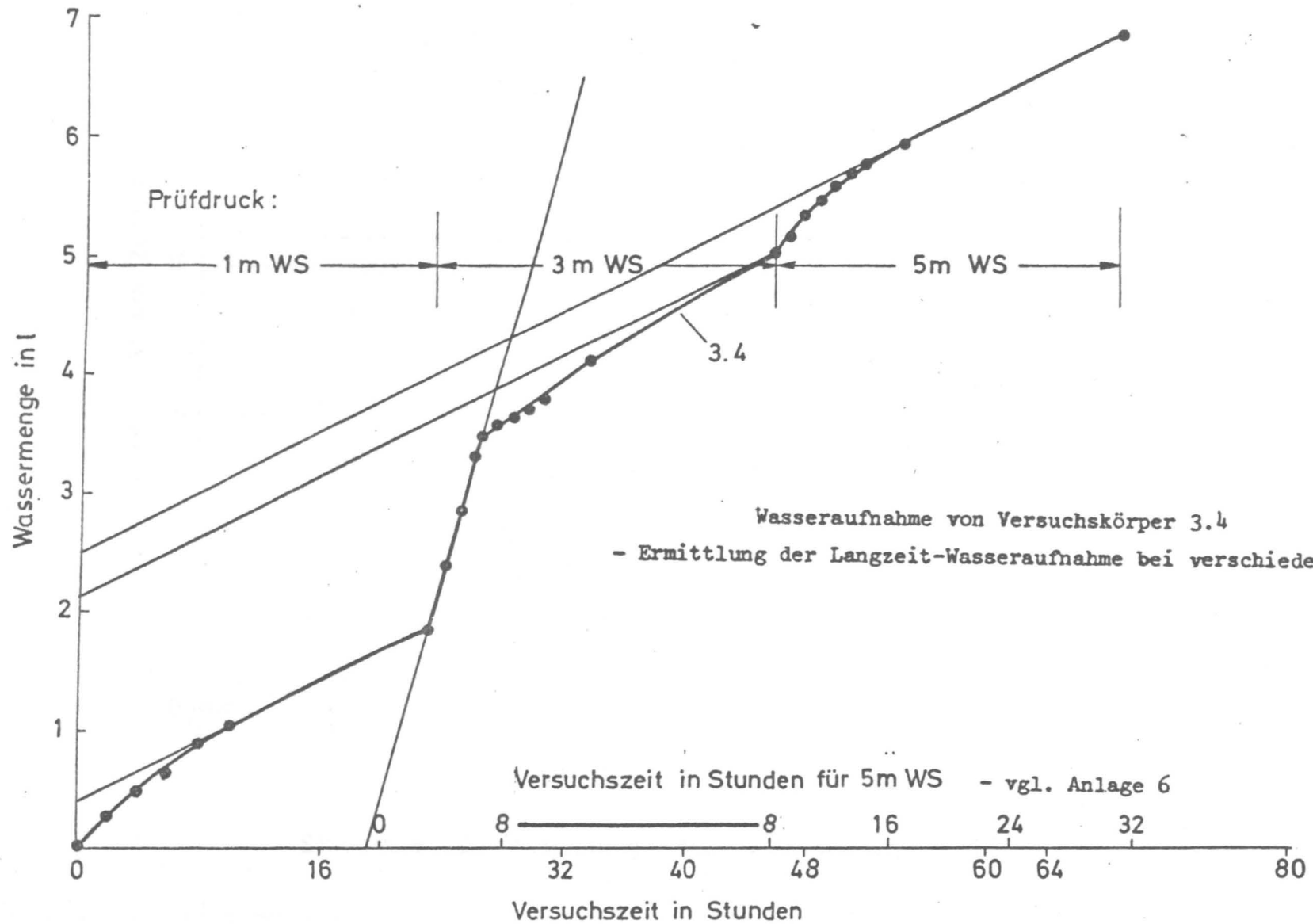


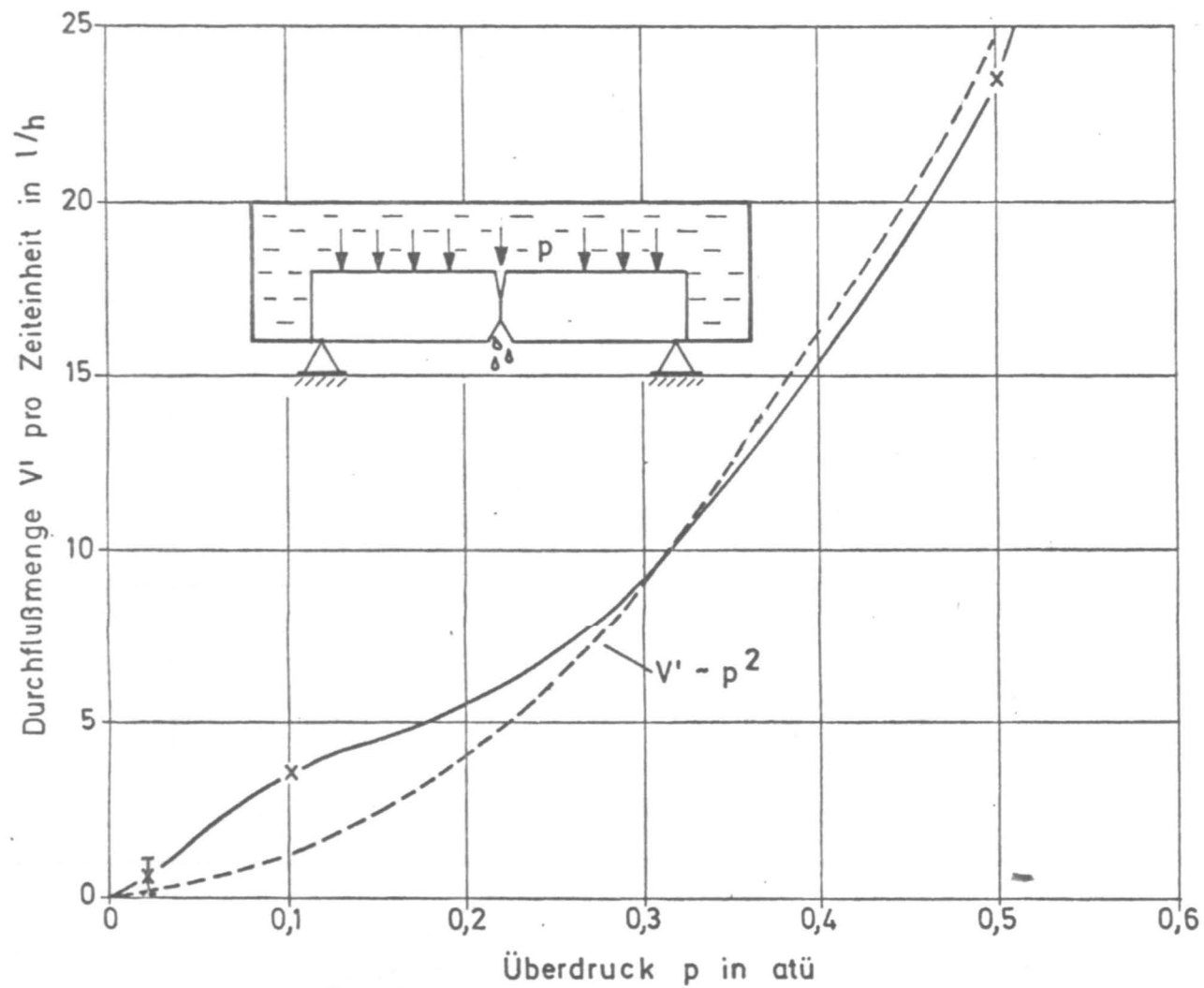
Wasserdichtigkeit - Versuchskörper der Serie 5



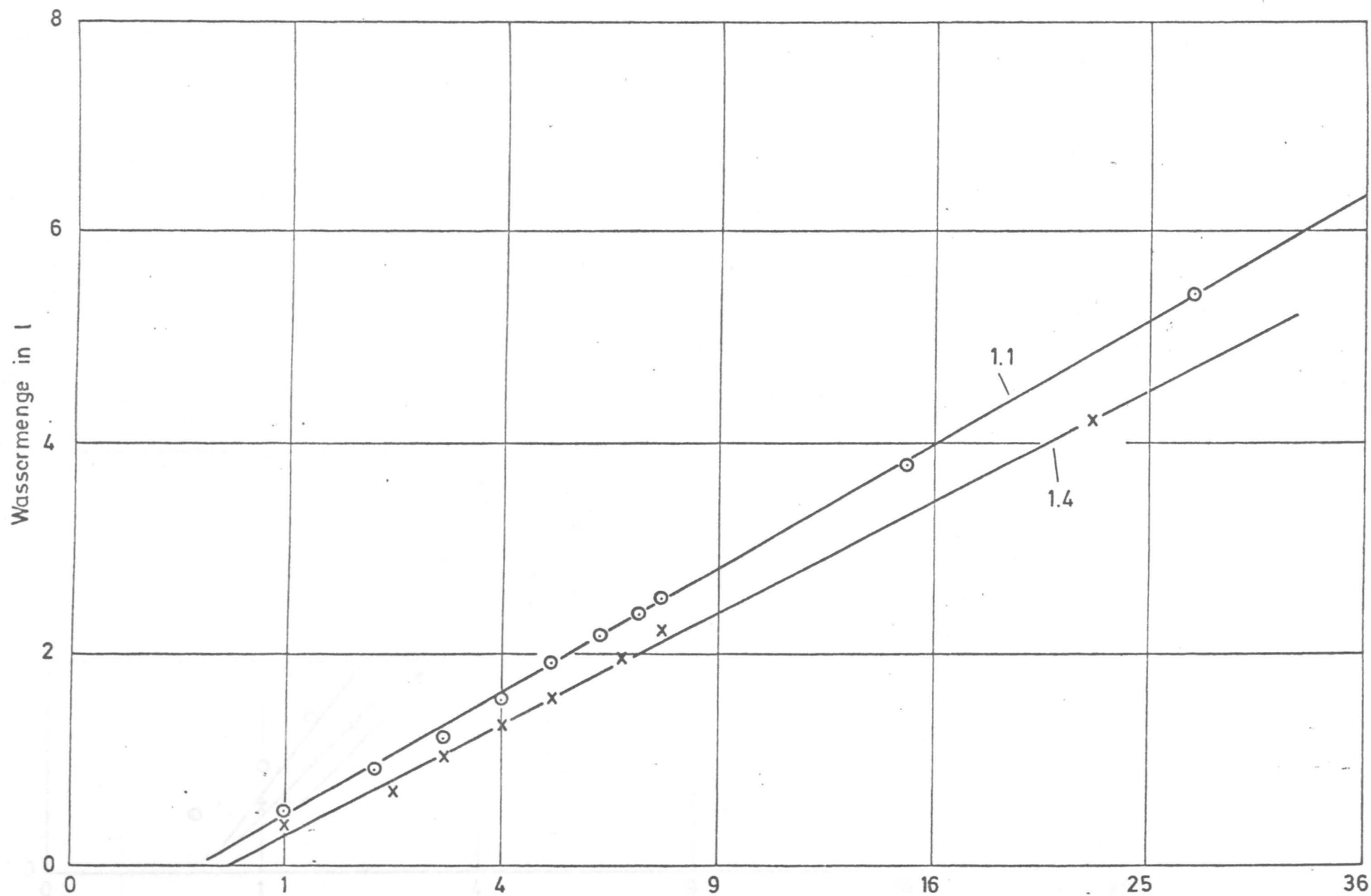
Wassersichtigkeit - Versuchskörper der Serie 4 und 6



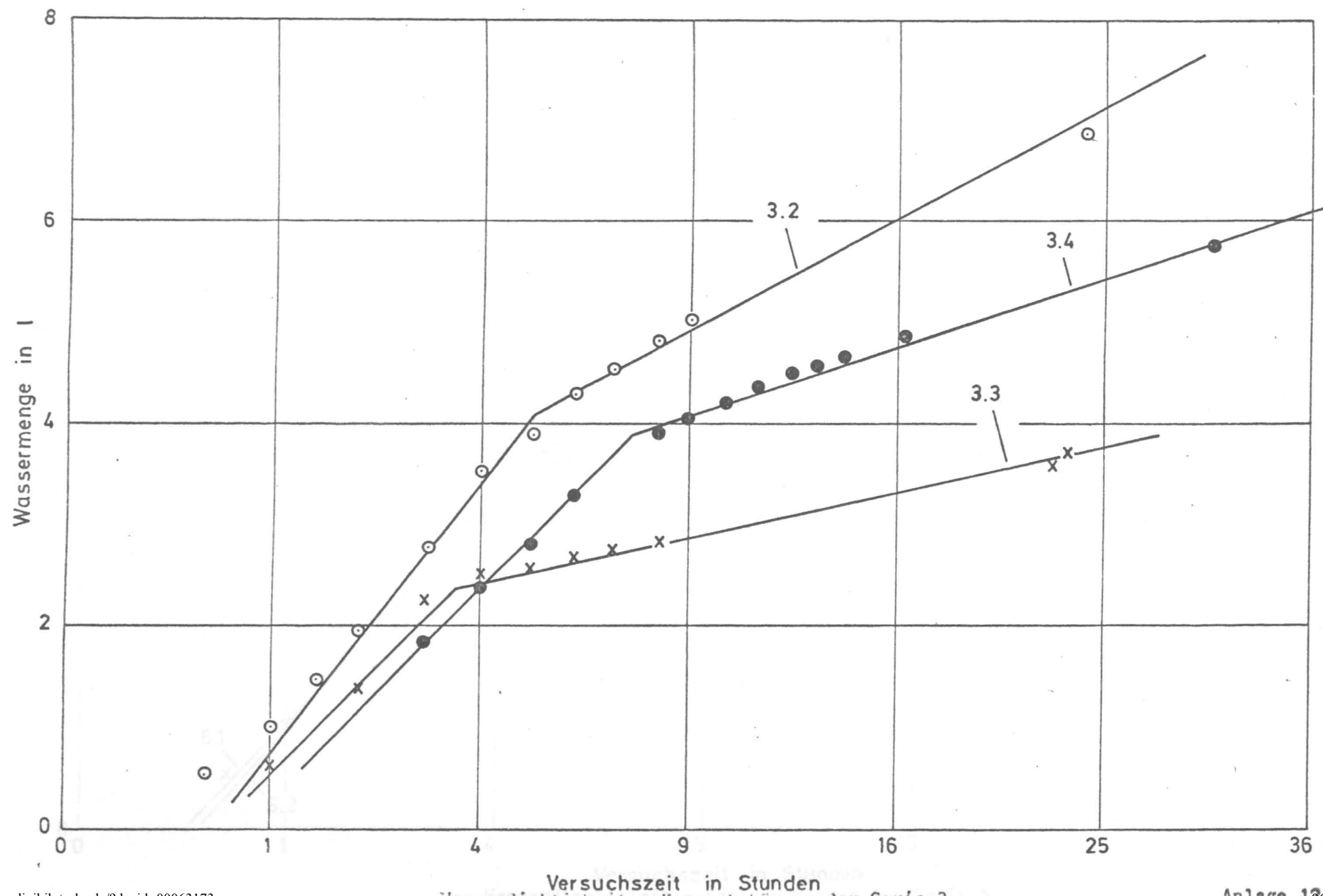


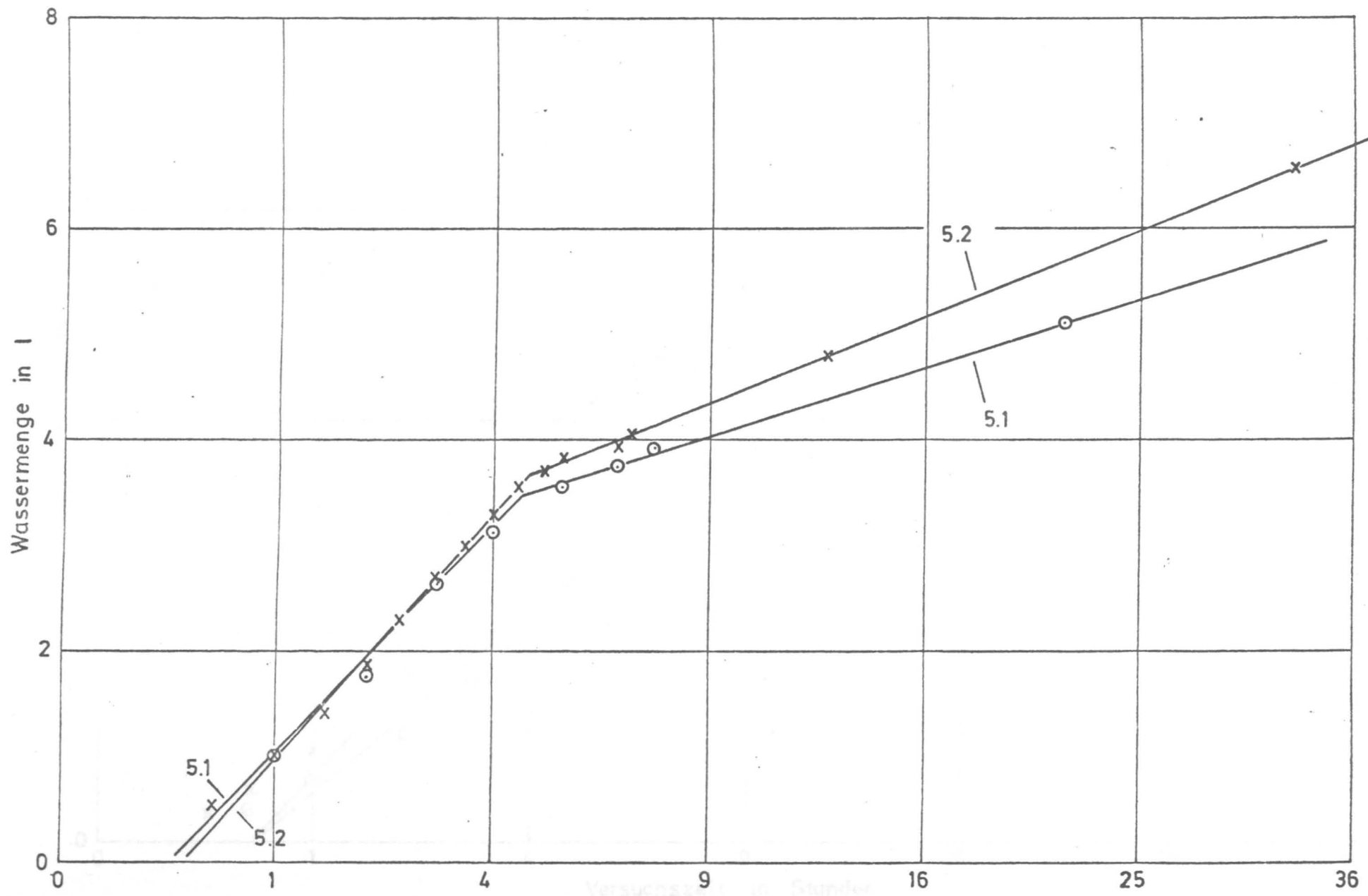


Stationäre Durchströmung des Versuchskörpers 1.2

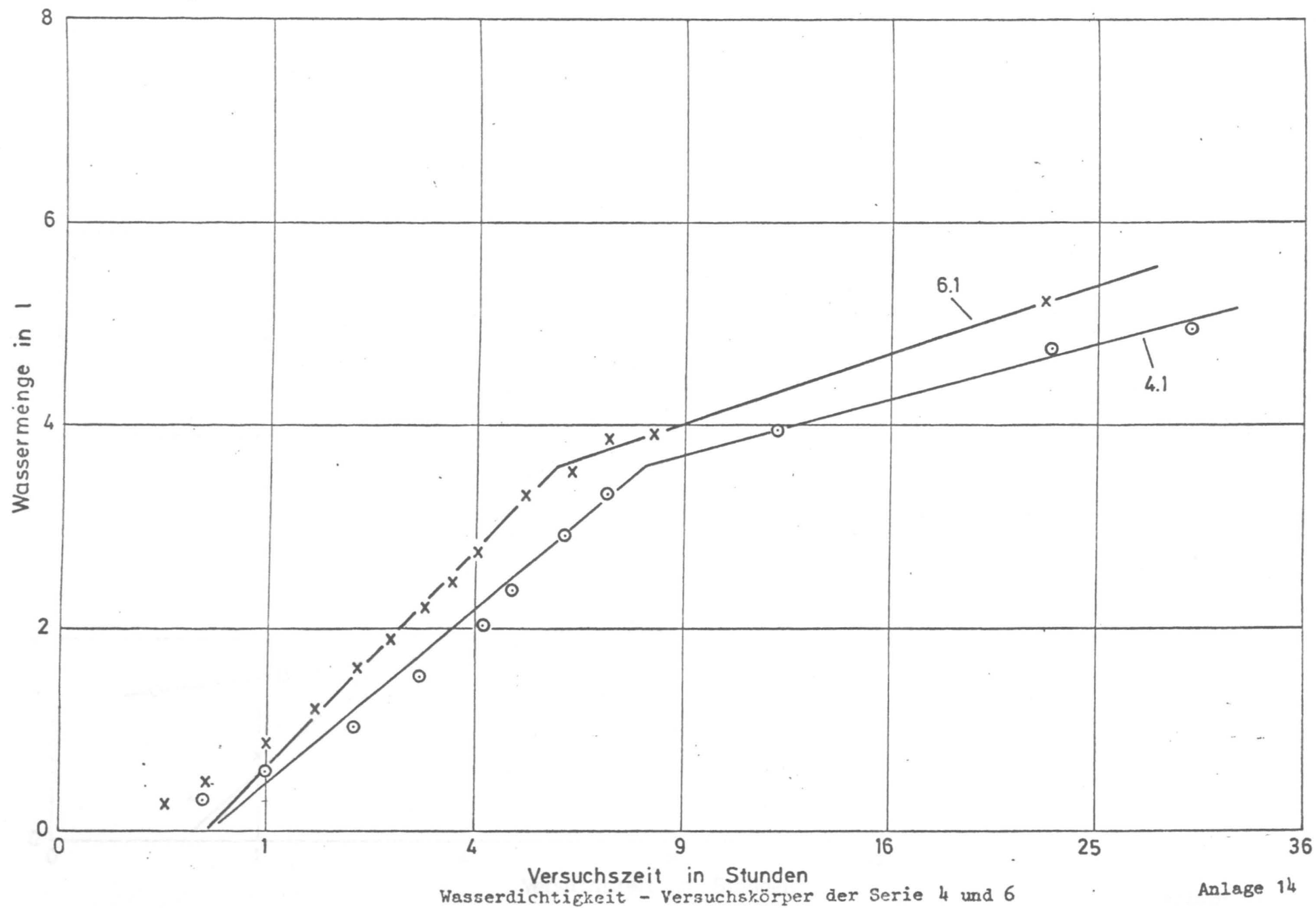


Wasserdichtigkeit - Versuchskörper der Serie 1

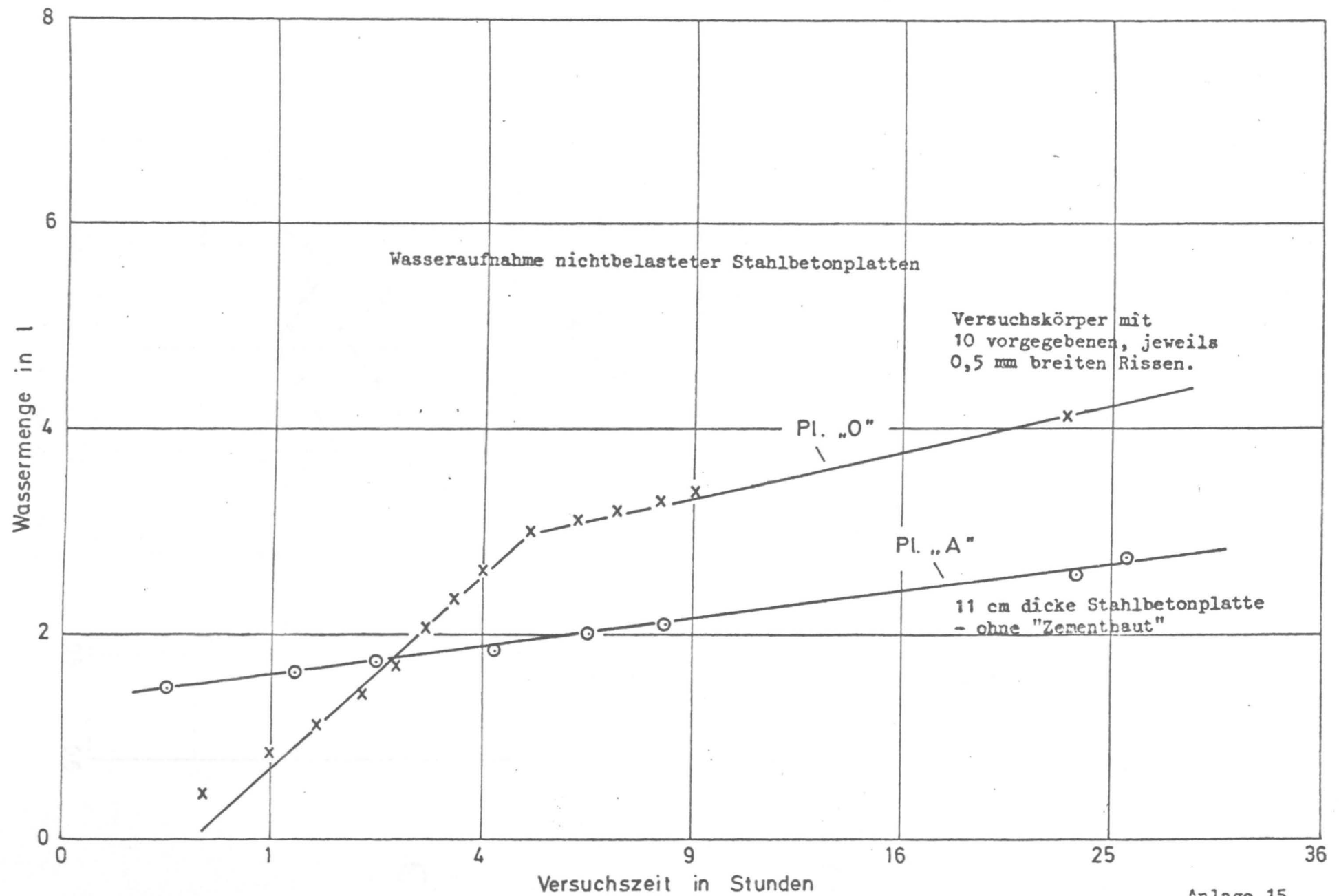


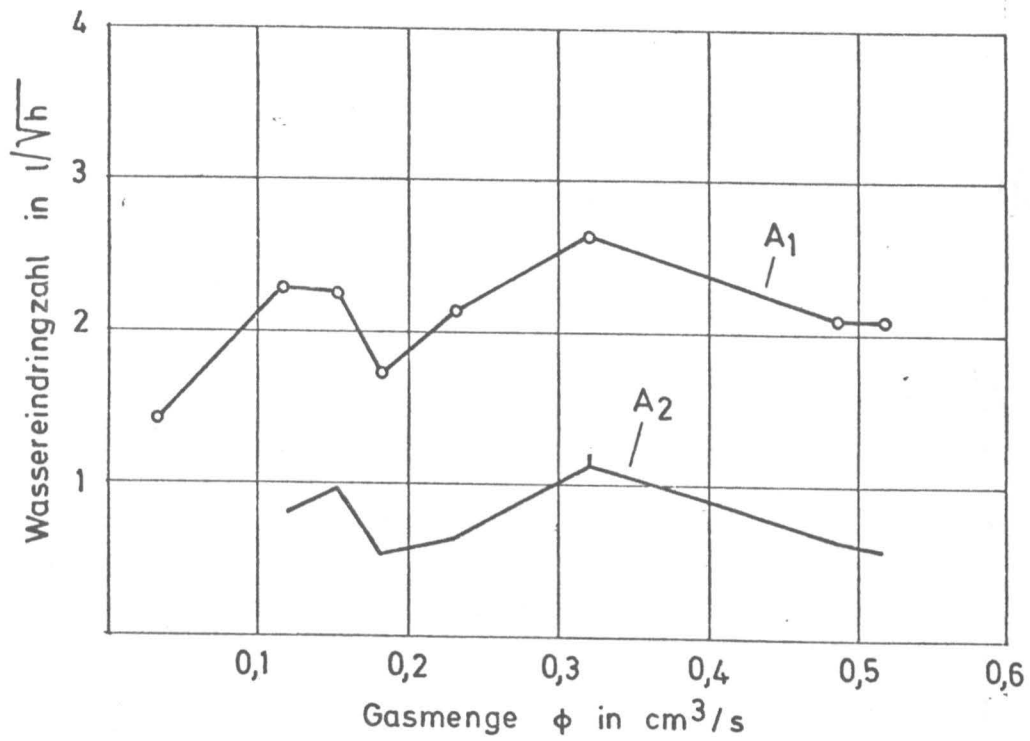


Wasserdichtigkeit - Versuchskörper der Serie 5

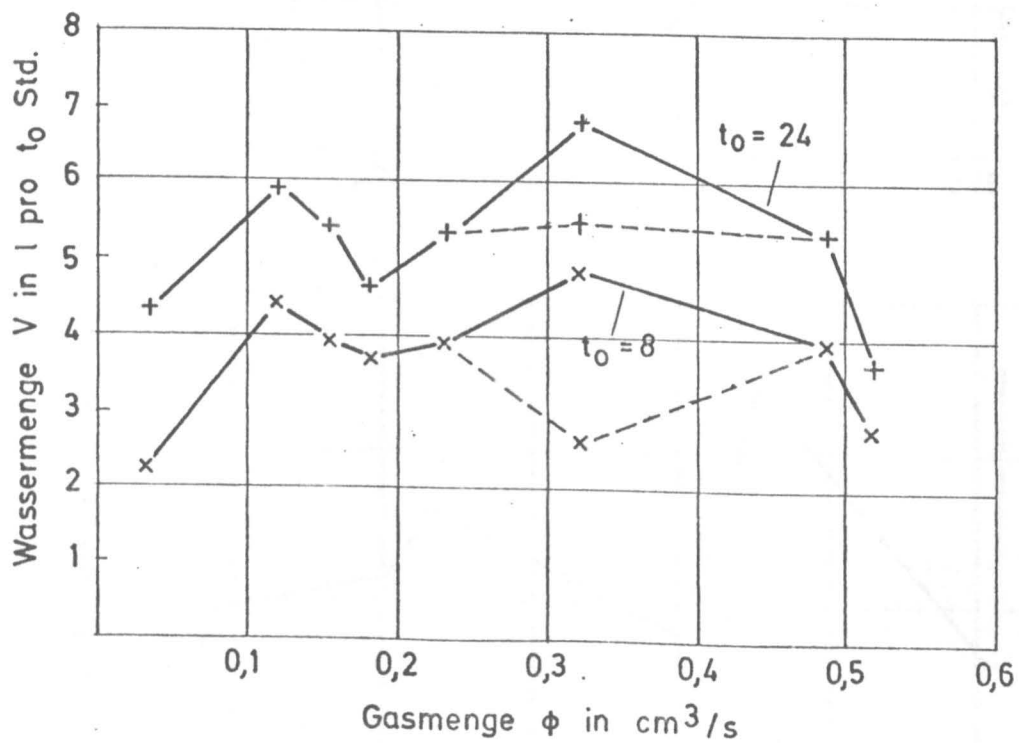
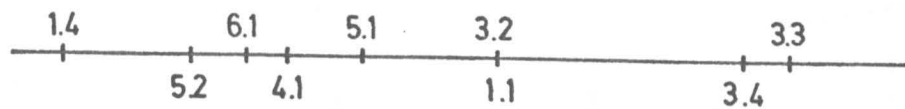






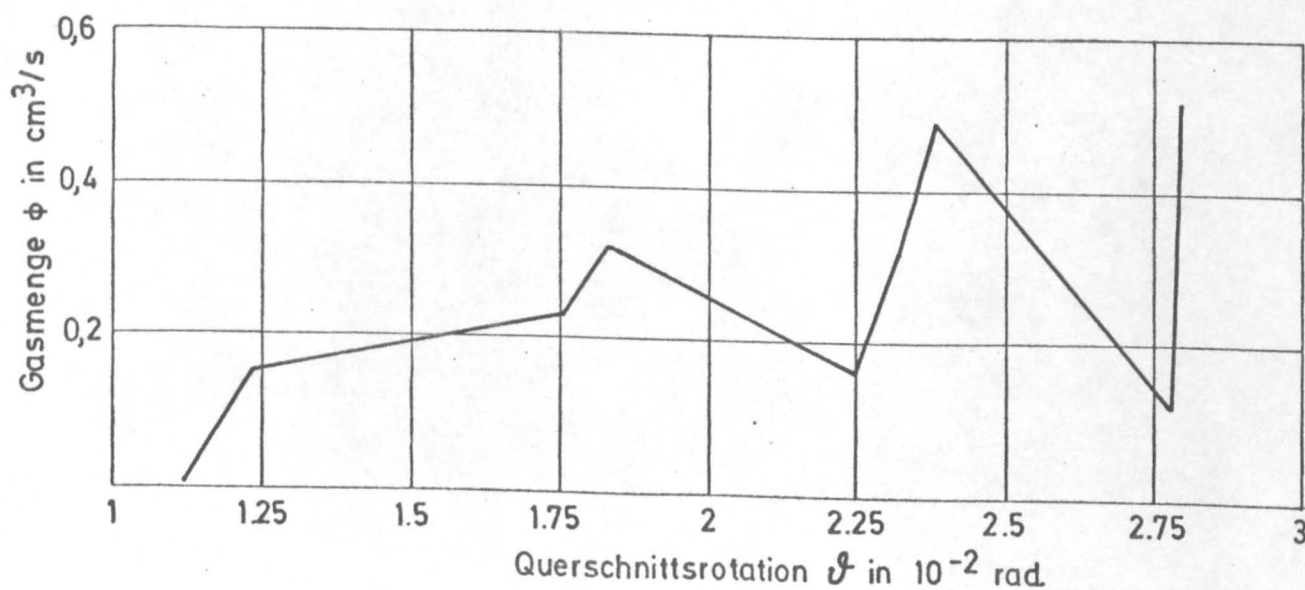
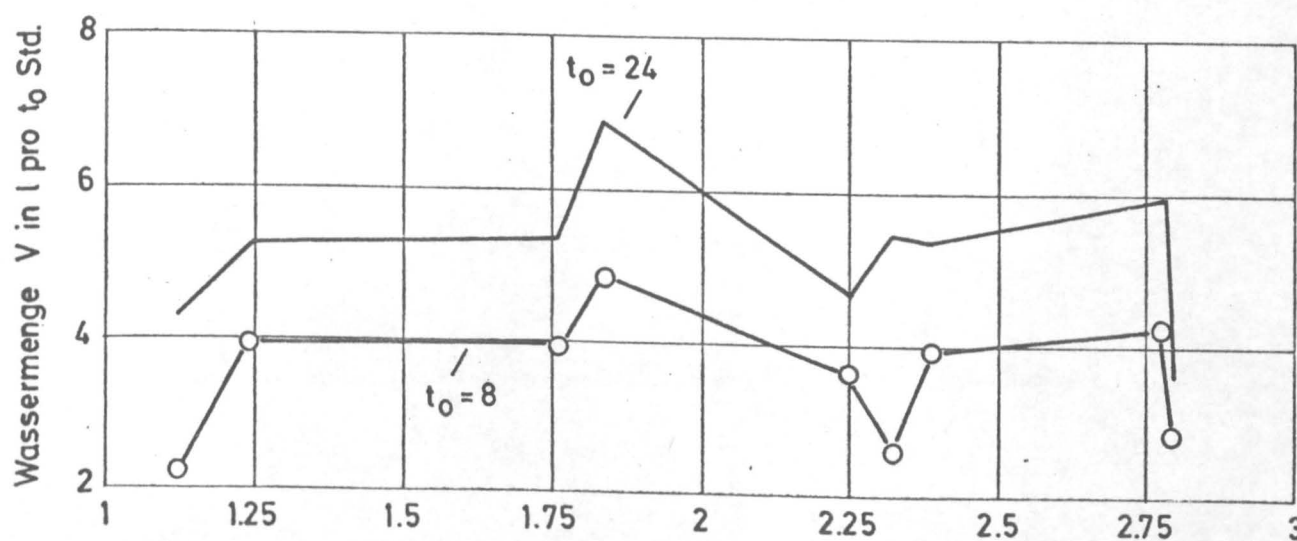
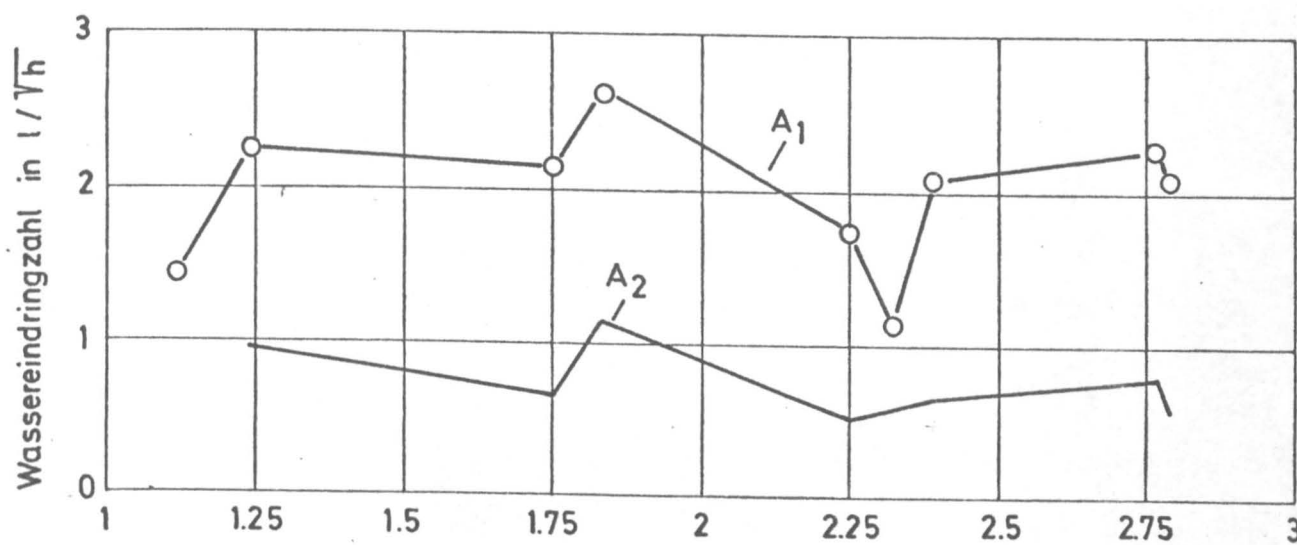
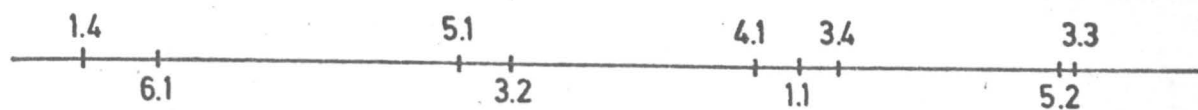


Versuchskörper



Zusammenhang zwischen Gas- und Wasserdichtigkeit

# Versuchskörper



Dichtigkeit in Abhängigkeit von der Rotation

Anlage 17